
УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ТРУДОВОЙ ШКОЛЫ

Я. И. ПЕРЕЛЬМАН

ФИЗИЧЕСКАЯ ХРЕСТОМАТИЯ

ПОСОБИЕ ПО ФИЗИКЕ И КНИГА ДЛЯ ЧТЕНИЯ

ВЫПУСК ВТОРОЙ

ТЕПЛОТА

С 24-МЯ РИСУНКАМИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ДОПОЛНЕННОЕ

ДОПУЩЕНО НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ СЕКЦИЕЙ ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧЕНОГО СОВЕТА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД · 1924



Гиз. № 6976. Ленинградский Гублит № 6143. Отп. 30.000 экз.

ОТ СОСТАВИТЕЛЯ.

В настоящее 2-е издание этого отдела включены следующие новые статьи:

Теплота жилища и одежды. *Я. Никитинского.*
Печи и отопление. *Л. Пфаундлера. — Г. Ганфштенгеля.*
Тепловой баланс самовара. *Ф. Н. Красикова.*
Паровые машины. *Г. Ганфштенгеля. — А. Фрейнда.*
Паровые турбины. *А. Фрейнда.*
Двигатели внутреннего сгорания. *Его же.*
Полезное действие паровой машины. *Ф. Ауэрбаха.*
Кинетическая теория газов. — *Г. Лоренца. — О. Д. Хвольсона. — Л. Греца.*
Броуновское движение. *А. Хааза.*
Энергия солнца — первичная причина жизни на Земле. *Г. А. Любославского.*
Приход и расход солнечной энергии на Земле. *А. В. Клоссовского.*
Пища и энергия. *Л. Пфаундлера.*
Постоянство температуры человеческого тела. *Э. Абдергальдена.*
Нагревание человеческого тела при работе. *М. Ю. Пиотровского.*

Некоторые статьи прежнего издания исключены или сокращены. Общее число иллюстраций увеличено.

Я. П.

Май 1924.

ТЕПЛОТА.

I. Теплопроводность. — Тепловое расширение. — Термометр.

Обманчивость тепловых ощущений.

Мы должны быть чрезвычайно осторожны в истолковании наших непосредственных ощущений в отношении теплоты. В самом деле: первый опыт убеждает нас в этом. Прикоснемся последовательно к разным вещам на столе. Пресс-папье, особенно если оно металлическое, будет обыкновенно холодно на ощупь; книги, бумага и в особенности шерстяная скатерть стола — сравнительно теплы. Но испытайте их не на ощупь, а термометром — и, по всей вероятности, вы найдете лишь ничтожную разницу или вовсе никакой в том, что мы называем их температурой. Мы убедимся, что сколько бы различных предметов ни было в комнате (в которой нет ни огня, ни другого источника теплоты), — все они стремятся принять одну и ту же окончательную температуру. Почему же одни наощупь кажутся холодными, другие — теплыми?

Дело просто в том, что осязание не указывает нам прямо температуру, а лишь *быстроту, с какой наши пальцы приобретают или теряют теплоту*. Предметы в комнате бывают обычно холоднее руки; теплота же всегда переходит с более теплого на более холодное. Из нескольких предметов, одинаково холодных по отношению к руке, наиболее холодным *на ощупь* покажется тот, который способен быстрее всего отводить теплоту руки. Следовательно, все дело сводится к *теплопровод-*

ности. Чтобы удостовериться в этом, сделаем следующий весьма простой опыт: поместим пресс-папье, книги и шерстяную скатерть в теплую печь и согреем их до одной и той же температуры, значительно превышающей температуру руки. Шерстяная скатерть покажется еще сравнительно холодной на ощупь, когда металлическое пресс-папье уже едва можно будет держать в руке. Порядок теплого и холодного, в обыденном смысле, стал как раз обратным: это потому, что теперь рука *получает* теплоту, от всех предметов, взятых для нашего опыта; она получает ее быстрее от тех предметов, которые в предыдущем случае быстрее ее отнимали.

Тилле (во Франции) и Благден и Чэнтри (в Англии) оставались около часу, чувствуя себя довольно сносно, в хлебопекарной печи [1]), температура которой была значительно выше точки кипения воды — в одном случае даже 160° Ц.; при этой температуре бифштекс изжарился бы в четверть часа [2]). И между тем как одежда не причиняла им ощутительного неудобства, они не могли взять в руки металлического пенала без того, чтобы не получить серьезного ожога.

С другой стороны, все металлические предметы, которые приходится брать в руки в сильные холода полярных экспедиций, должны быть тщательно покрыты пенькой, шерстью или другим плохим проводником тепла, так как прикосновение к очень холодному металлу производит почти неотличимое от ожога повреждение, хотя причина

---

[1]) «Сравним состояние двух живых человеческих существ,—говорит по этому
поводу Тиндаль,— с состоянием двух мраморных статуй, помещенных в ту же
печь. Статуи постепенно нагреваются до тех пор, пока не примут температуры
печи; температура же тела у этих людей, находящихся в таких же условиях, не под-
нимается подобным образом — иначе ткани тела непременно разрушились бы,
так как выдерживаемой ими температуры более чем достаточно, чтобы сварить
мускулы в тех жидкостях, которыми они пропитаны. Но дело в том, что теплота
крови едва подвергается влиянию сильной внешней теплоты. Эта теплота, вместо
того, чтобы повышать температуру тела, производит работу, изменяя физическое
состояние тела: теплота вызывает испарину, т.-е. протесняет жидкость через поры
и частью испаряет ее. Теплота расходуется на работу. В этом состоит, если можно
так выразиться, отводный канал, через который тело избавляется от избытка теп-
лоты. Здесь, как и при таянии льда или испарении воды, теплота идет не на повы-
шение температуры, а на производство работы». (Тиндаль. «Теплота, как
род движения»).

[2]) «Можно сварить яйца и приготовить бифштекс посредством теплоты ком-
наты, в которой люди могут оставаться без вреда для себя» (Тиндаль).

здесь прямо противоположна. Оба явления зависят единственно от сравнительной легкости, с какой теплота проводится металлами.

П. Дж. Тэт.

«Теплота», 1883.

Теплопроводность.

Теплота одежды.—Теплопроводность порошков.—Накипь.— Опыты.

1. Дурная теплопроводность шерстяных тканей делает их чрезвычайно удобными для одежды; они предохраняют тело и от внезапного согревания и от внезапной потери теплоты. Та же дурная теплопроводность обнаруживается и тогда, когда мы заворачиваем во фланель кусок льда: защищенный таким образом, он медленнее тает. Шерстяное платье, покрывая тело человека в холодный день, мешает передаче теплоты изнутри наружу; такая же ткань, обертывающая лед в теплый день, препятствует распространению наружного тепла внутрь. Природа снабдила животных, населяющих холодные страны, необходимою для них одеждою. Птицы особенно нуждаются в такой защите, потому что кровь их еще теплее, чем у млекопитающих; они снабжены перьями, а промежутки между ними наполнены пухом, строение которого делает его едва ли не худшим из всех проводников. Здесь перед нами один из примеров приспособления жизни к ее условиям, с которыми так часто приходится встречаться естествоиспытателю.

2. На распространение теплоты имеет громадное значение механическое строение тела, через которое она проходит. Чистый кремнезем в виде твердого кристалла горного хрусталя лучше проводит теплоту, чем висмут или свинец; но если этот кристалл превратить в порошок, то теплота будет распространяться в нем чрезвычайно медленно. Через прозрачный кусок (кристалл) каменной соли теплота проходит свободно, а через обыкновенную поваренную соль — очень слабо. Положив на руку азбест, состоящий из кремнистых волокон, можно поместить на него раскаленный до-красна железный шар, и рука не будет обожжена; азбест задерживает теплоту, и, конечно, распространению теплоты мешает именно его волокнистое строение. Это и понятно: теплота есть движе-

ние, и все, что разрушает непрерывность молекулярной цепи, вдоль которой распространяется это движение, препятствует его распространению. В азбесте кремнистые волокна отделяются друг от друга воздухом, вследствие чего движение, распространяясь, должно переходить от кремнезема к воздуху, телу очень легкому, и опять от воздуха к кремнезему — телу сравнительно тяжелому. Легко понять, что движение должно итти с большим затруднением через тело, имеющее такое сложное строение. Это особенно заметно в мехах животных: здесь, кроме воздуха, находящегося между волосами, сами волоса — очень дурные проводники. Наблюдались случаи, когда лава протекала по слою золы, под которым находился лед: дурная теплопроводность золы предохраняла лед от таяния. До-красна раскаленные ядра можно подвозить к пушке на деревянных тачках с песком. Для предохранения льда от таяния его окружают мыльной пеной. Порошок древесного угля также чрезвычайно дурной проводник. Но иногда употребление опилок, рубленой соломы, древесного угля не вполне безопасно вследствие их горючести; в таких случаях они с выгодой могут быть заменены порошком гипса. Кристалл гипса несравненно хуже проводит теплоту, чем кремнезем, и можно безошибочно предсказать, что в порошке своею дурною проводимостью теплоты он значительно превосходит песок, каждая отдельная крупинка которого — хороший проводник.

3. Вода, просачиваясь сквозь землю, более или менее растворяет вещества, к которым прикасается; так, в меловых пластах вода всегда содержит некоторое количество углекислой извести; такая вода называется «жесткой». Другую обычную примесь воды составляет сернокислая известь. При парообразовании вода улетучивается, а минеральные примеси остаются на месте, нередко в значительном количестве. Многие источники так напитаны углекислой известью, что когда воды их достигают земной поверхности и выступают на воздух, где они могут частью испаряться, то минеральная примесь осаждается и образует слой извести на поверхности тех растений и камней, по которым вода течет. То же самое происходит и при кипении воды: минеральные частицы осаждаются, и едва ли найдется во всем Лондоне хоть один котел, который не был бы изнутри покрыт минеральной накипью. Это представляет большие неудобства для паровых котлов; накипь — дурной проводник, и она бывает иногда так толста, что действительно может задерживать доступ

теплоты к воде. Передо мною лежит обломок котла с парохода, который погиб вследствие истощения топлива: чтобы доплыть до берега, сожгли все находившееся на нем дерево. Впоследствии при исследовании обнаружили внутри него этот толстый слой накипи; она состоит преимущественно из углекислой извести, вследствие дурной теплопроводности которой требуется слишком много топлива для образования необходимого количества пара. Медленность, с которой закипает вода во многих паровых котлах, зависит без сомнения от подобной же причины.

4. Здесь будет небесполезно привести пример действия хороших проводников — действия, состоящего в том, что они предупреждают местное накопление теплоты. Берем два шара одинаковых размеров, покрытых сплошь белой бумагой; один из них медный, другой — деревянный. Держим каждый из них над пламенем спиртовой лампы, и вскоре замечаем действие теплоты. Тепловое движение сообщается, конечно, обоим шарам, — но в медном оно быстро распространяется по всей массе от места непосредственного действия пламени; в деревянном же такого быстрого распространения нет, — здесь теплота сосредоточивается в той части шара, на которую действует пламя. И действительно: на деревянном шаре бумага в месте действия пламени совершенно обуглена; на медном же бумага не только не обуглена, но даже увлажнена на своей обратной стороне водяными парами, выделяемыми пламенем.

Джон Тиндаль.

«Теплота, как род движения», 1880.

Теплота жилища и одежды.

Наихудшим проводником тепла из распространенных тел является воздух. Поэтому из него и делается [в сущности] большинство стен. Именно, чаще всего стены рубятся из дерева и кладутся из кирпича. И то и другой весьма пористы, и поры эти наполнены воздухом. Чем более содержит строительный материал воздуха, тем менее теплопроводны стены; поэтому стены из дерева, содержащего очень много воздуха (60 — 70% пор по объему) можно делать толщиною 20 — 25 сантиметров, тогда как из менее пористого кирпича (17 — 20% пор по объему) стены приходится делать не менее 70 сантиметров.

Насколько большое значение имеет для сохранения комнатного тепла воздух стен, видно уже из того, что сырой каменный дом — всегда холодный, так как в кирпиче сырого дома воздух пор замещен лучшим проводником тепла — водою.

Для сохранения тепла важно, чтобы камень был тонкопорист и чтобы поры эти были распределены во всем теле кирпича равномерно. Именно, необходимо, чтобы воздух в камне не мог легко перемещаться, чтобы он был малоподвижен. Таков именно кирпич, сформированный из хорошо, вполне равномерно промешанной глино-песчаной массы и ровно обожженный, не слишком слабо, — иначе он будет слаб, рыхл, — но и не слишком сильно, иначе он обращается в малопористый, спеченный или оплавленный «железняк». Требованию большего содержания малоподвижного воздуха удовлетворяет также и применяемый для кладки кирпича раствор извести с песком, или романского цемента с песком; по затвердевании получается пористая масса цемента.

Итак, жилище есть пространство, ограниченное весьма плохим проводником тепла — малоподвижным воздухом. Помощью жилища мы понижаем расход тепла нашего тела.

Другим средством, ведущим к той же цели, является одежда, и средство это в сущности вполне аналогично жилищу: одежда — это слои малоподвижного воздуха, носимые нами около нашего тела.

В 1000 объемах разных тканей содержится воздуха объемов:

	Объемов.
Плотная гладкая бумажная ткань	500
Шелковое трико	832
Шерстяное трико	860
Бумажная фланель	888
Мех с волосами и кожею	950 — 980
Волосяная часть меха	975 — 988

Таким образом, различные ткани, смотря по плотности, содержат от 50 до 99% по объему пор и только 3—50% плотного вещества. Поэтому в ткани большую роль играет именно воздух, а не самый материал ткани. Всем известно, что шелковая ткань греет больше, чем бумажная, и это потому, что в первой заключается больше воздуха. Еще больше его в мехе, почему он наиболее тепел.

Помимо тех слоев малоподвижного воздуха, которые заключаются в самих надеваемых нами различных частях ткани, между этими тканями находятся еще слои воздуха, тоже малоподвижного, которые, в свою очередь, способствуют сохранению тепла. В этом сущность той цели, с какой мы прибегаем к нескольким слоям одежды.

Проф. *Я. Никитинский.*

Температура подземелий.

Погреба Парижской обсерватории, вырытые под ее зданием, имеют глубину 28 метров; до этой же глубины опущен фундамент обсерватории. И уже более двух столетий здесь ведутся наблюдения над состоянием термометра. Последний показывает постоянно 11°,7 по Цельсию.

В 1671 г. 24 сентября установлен был в первый раз в подземельи обсерватории термометр и оставлен там на известное время. На следующий день, 25 сентября, произвели тщательное наблюдение над высотою ртути в нем. В течение следующих месяцев октября и ноября наблюдатели многократно спускались в подземелье и всякий раз находили, что термометр показывал ту же самую температуру. Этот термометр был устроен аббатом Мариоттом. Таковы самые старые наблюдения над температурою погребов обсерватории. Постоянство этой температуры тотчас же было принято как проверенный опытом факт. Лагир, в конце семнадцатого века, взял эту температуру за одну из постоянных точек своего термометра и отметил ее цифрой 48 на своей тепловой скале Реомюра, в мемуаре, напечатанном в 1730 г., дал в первый раз определение этой температуры в градусах термометров, допускающих сравнение с другими.

В 1783 г. Лавуазье лично устроил новый термометр, который был установлен в обсерватории. Этот термометр Лавуазье, служащий образцовым инструментом погребов обсерватории, был помещен на отдельном столбе перед прежним столом для термометров.

С 1783 г. по 1817-й этот термометр повысился до 12°, 806 сотенной шкалы. По этому поводу Араго задался вопросом — не произошло ли это незначительное повышение от свойств самого прибора?

Чтобы проверить эту догадку, он попросил Гей-Люссака устроить собственноручно новый термометр. Этот ученый физик согласился на просьбу Араго и с величайшею точностью произвел деление на градусы нового прибора, который затем и был установлен рядом с термометром Лавуазье, при чем соблюдены были все прежние предосторожности. Путем сравнения была обнаружена погрешность в + 0°,380 в прежней градуации термометра, вследствие перемещения нулевой точки его шкалы. (Следует заметить, что с течением времени почти все термометры начинают давать неверные показания, так как их нуль или точка таяния льда поднимается вдоль скалы, как будто шарик, заключающий ртуть, постепенно сжимается, уменьшается в объеме). Итак, температура подвала в 1817 г., вместо 12°,086, приводилась к 11°,706.

Сам я спустился в это прославленное подземелье 24-го сентября 1871 г., ровно, день в день, через два столетия после первого термометрического наблюдения, сделанного здесь. Ходы, ведущие из подземелья в парижские катакомбы, были закрыты; но могильная тишина, царящая на этой глубине, располагает к размышлению и самоуглублению в такой же степени, а может быть даже и более, чем груды костей и скелетов, находящихся рядом с вами. Это колоссальное здание, воздвигнутое Людовиком XIV, возносящее свою верхнюю террасу на 27-метровую высоту, спускается и под почву также на 27 метров. В его подземелье, в галлерее термометров как бы носятся еще безмолвные воспоминания о тех знаменитых ученых, которые некогда ходили по ней; пред вами витают тени Кассини, Реомюра, Лавуазье, Лапласа, Гумбольдта, Араго... Ни атмосферные, ни политические бури и грозы не доходят до этого святилища и не нарушают его безмолвия... В этот день термометр Гей-Люссака показывал 11°,7 по Цельсию.

После того я вновь спускался в то же подземелье и опять нашел там ту же самую атмосферу. Это было 18 марта 1887 г. Температура внешнего воздуха была 3 градуса ниже нуля, и снег белым слоем покрывал почву. Но температура погреба в обсерватории осталась тою же, как и всегда: 11°,7.

К. Фламмарион.

«Атмосфера».

Потеря теплоты лучеиспусканием.

Предположим, что мы, путешествуя в суровое зимнее время, останавливаемся в гостинице и немедленно требуем отопления взятой нами комнаты. Чрез некоторое время печь достаточно горяча, комнатный термометр показывает довольно высокую температуру воздуха, — однако, нам что-то не удается достаточно согреться; мы продолжаем чувствовать некоторую неприятную свежесть, несмотря на то, что термометр показывает 16° Р. Как только печь вытопилась, мы тотчас замечаем быстрое падение температуры комнаты; теплота в ней, повидимому, плохо держится, так что комната тотчас охлаждается. Но если мы станем жить в той же комнате в продолжение нескольких дней и правильно отапливать ее, то непременно почувствуем нечто совершенно иное. Мы заметим, что в комнате достаточно тепло даже при 14°Р.; между тем как прежде замечалась в ней свежесть при 16°Р. Вы немедленно объясните себе, почему сначала в комнате было прохладно при 16°Р., а потом установилась приятная теплота при 14°Р., сказав просто, что комнату, стоявшую долгое время холодною, следует первоначально «протапливать», чего невозможно достигнуть в один прием. Но что же отличает протопленную комнату от комнаты, недостаточно протопленной? Конечно, только количество теряемой, путем усиленного лучеиспускания, теплоты, достигаемой в непротопленной комнате. Лучеиспускание увеличивается и возрастает с увеличением разности температуры двух тел, неодинаково нагретых. Так как в комнате находится не только воздух, нагретый до 16°Р., но в ней есть еще и стены и мебель и т. д., которые нагреты, быть может, только до 2° или 3°, между тем как температура воздуха успела достичь до 16°, то мое тело, значительно более теплое, испускает по направлению окружающих предметов значительно более тепла, чем если бы эти предметы были нагреты до 12 и более градусов.

Каждому из нас удавалось путем опыта познакомиться с этим явлением и в обратном смысле, в тех случаях, когда крайне ограничивается потеря тепла путем лучеиспускания. Я укажу только на грустное положение людей в тесно наполненном зале, при теплом влажном воздухе. Сначала начинает гореть голова, вслед за тем чувствуется невыносимый жар по всему телу; но если случайно взгля-

нуть на термометр, висящий в зале, то подумаешь, что показания его не верны, потому что большею частью найдешь на нем 16 или 17°Р., т.-е. указание на такую температуру, при которой чувствуешь себя, сидя в своей комнате, совершенно довольным и здоровым. Это явление вы также объясните безусловно верно, сказав, что все это происходит от тесноты. Выбравшись из тесноты и вступив в боковую комнату, чтобы подышать, как говорится, свежим воздухом, мы почувствуем себя заметно облегченными; но, взглянув на термометр, мы нередко найдем, что температура комнатного воздуха не ниже температуры зала. В чем же, однако, заключается различие между залом, переполненным народом, и залом пустым, допустив в двух этих помещениях совершенно одинаковую температуру воздуха? В тесноте каждое тело окружено одинаково теплыми другими телами. Приход и расход путем лучеиспускания взаимно покрываются, и трата теплоты телом производится почти исключительно проводимостью воздуха, проникающего в промежутки, и испарением воды с поверхности тела.

М. Петтенкофер [1]).

«Общедоступные чтения», 1873.

Способы получения высоких температур.

Стремление получать более или менее высокие температуры для обогревания, приготовления пищи и искусственного освещения мы встречаем при первых шагах культурного развития человека. Сказание о подвиге Прометея, научившего людей пользоваться огнем и тем освободившего их от безропотной покорности слепым силам природы, в поэтической форме передает то, чему учит современная антропология, считающая умение пользоваться огнем первым культурным шагом первобытного человека; дальнейшее усовершенствование в приемах пользования огнем, необходимое для выплавки руд, сопровождалось колоссальным шагом вперед, переходом от «каменного» века к «бронзовому».

За те тысячелетия, которые протекли с начала бронзового века до начала истекающего столетия, технический прогресс в приемах

[1]) Макс Петтенкофер (1818 — 1901) — знаменитый германский гигиенист.

получения тепла ограничивался употреблением горения твердого топлива (дерева, каменного угля, торфа) и в редких случаях жидких веществ (растительных масл). Совершенно новая эра, еще более отличная от предыдущей, чем бронзовый век от каменного, начинается вместе с развитием естествознания, благодаря заботливому, систематическому изучению явлений природы; здесь первые шаги современной химии сопровождались переворотом всего миросозерцания человека, и объяснение горения, как рекации окисления, которое установил Лавуазье, впервые вывело вопрос о получении высоких температур на научную почву. С другой стороны, развитие учения об электричестве, практические приложения которого создали современную электротехнику, в свою очередь, дало нам в руки ряд весьма удобных приемов получать весьма высокие температуры. Ознакомимся теперь с наиболее часто употребляемыми способами и приборами, назначенными для получения высоких температур.

Рассмотрим сперва тепловые процессы, сопровождающие химическую реакцию окисления: сгорая в кислороде, каждый грамм данного вещества выделяет совершенно определенное количество тепла [1]); если мы будем производить наши опыты при наивыгоднейших условиях — в замкнутой оболочке, совершенно не пропускающей тепла, — то вся выделившаяся теплота потратится на нагревание полученных продуктов горения; подводя новые порции кислорода и горючего материала, мы не можем достигнуть более высокой температуры, так как вся вновь выделяющаяся теплота потратится на нагревание вновь образовавшихся продуктов сгорания до той температуры, которой мы уже достигли раньше. Дальнейшее повышение температуры можно, впрочем, получить, если как горючий материал, так и необходимый для сжигания кислород предварительно нагревать до возможно высокой температуры. Этот прием, казалось бы, открывает возможность достигнуть любой температуры, если воспользоваться полученною более высокою температурою снова для подогревания продуктов горения, долженствующих дать еще более высокую температуру и т. д. Здесь, однако, приходится сталкиваться с новыми явлениями: при очень высоких

[1]) Количество граммокалорий, выделяемое при сгорании одного грамма вещества, приблизительно таково: уголь — 8.000, дерево — 4.000, нефть — 11.000, водород — 34.000, светильный газ — 5.500.

температурах химическое сродство кислорода и сжигаемого материала начинает делаться все меньше и меньше, количество тепла, выделяемого каждым граммом вещества, все убывает, сгорание делается неполным, а если какими-либо другими источниками тепла и удается достигнуть еще более высокой температуры, то реакция окисления прекращается или даже идет в обратном порядке — продукты реакции распадаются на свои составные части, они диссоциируют; таким образом, температура, близкая к температуре диссоциации продуктов горения, есть *наивысшая температура*, которую мы можем получить, пользуясь химическою реакциею.

На пути к достижению этих теоретически возможных наивысших температур встречаются, однако, большие затруднения: так, вводя нагреваемый предмет в свободное пламя, мы не можем нагреть его до температуры пламени: огромное количество тепла теряется излучением раскаленной поверхности в окружающее пространство. До значительно более высокой температуры мы можем нагреть тело, окружая его стенками печи, раскаляемыми тем же пламенем; но и в этом случае еще большое количество тепла беспрерывно уводится стенками печи и передается воздуху, окружающему печь.

Если же, несмотря на эту беспрерывную непроизводительную потерю тепла, хотим достичь возможно высоких температур, необходимо поставить процесс окисления так, чтобы в данном объеме возможно большее количество материала успевало окислиться в единицу времени, чтобы горение происходило возможно энергично. Весьма важным фактором при выборе материалов и приемов является вопрос о стоимости эксплоатации; поэтому в последующем я ограничусь рассмотрением лишь тех способов, которые уже нашли обширное применение в лабораторной или технической практике.

Один из наиболее известных примеров печи, в которой получается высокая температура, — это *доменная печь*, служащая для выплавки чугуна из руды; цилиндрическую башню TT (см. рис. 1 и 2), сложенную из огнеупорного кирпича [1]), наполняют попеременно слоями топлива (каменного или древесного угля) и слоями руды, и затем внизу зажигают уголь; чтобы обеспечить быстрое сгорание, по трубе G нагнетают воздух при помощи паровой воздуходувной машины. При

[1]) Обычные размеры подобной печи: 15 метров высоты при 4 м внутреннего диаметра. — *П. Л.*

такой высокой температуре, которая развивается в доменной печи (1400 — 1500°Ц), происходит интересная реакция: руда, представляющая собою окислы железа, раскисляется, так как при этой высокой температуре химическое сродство между железом и кислородом меньше, чем между углем и кислородом; кислород переходит от железа к углю, и освобожденное железо — жидкое при этой высокой температуре—стекает в нижнюю часть печи, E, и оттуда поступает в приготовленные формы [1]); выплавка идет беспрерывно, достигая в сутки до 60—90 тыс. кгр чугуна; содержимое печи постепенно оседает и постоянно пополняется новыми запасами угля и руды, которые подвозятся вагонетками W к верхней части печи. Заметим здесь, что тот же прием раскисления оказывается неприложимым для получения металлического алюминия из глины: приходится прибегать к электрической печи для получения достаточно высокой температуры.

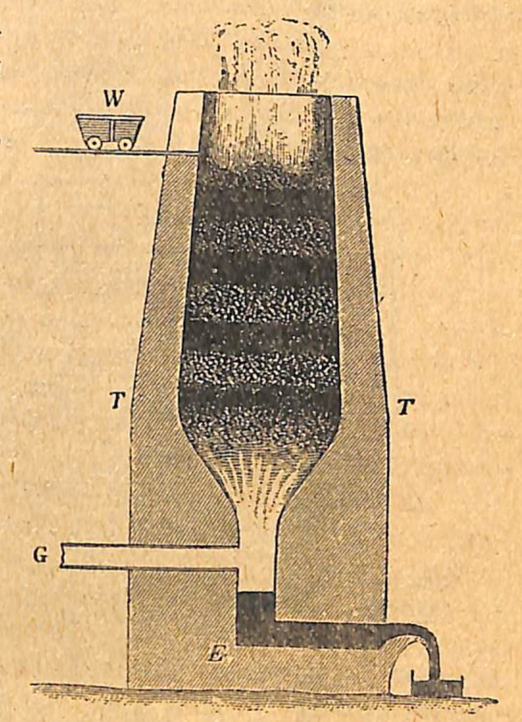


Рис. 1. Схема устройства доменной печи.

Не только уголь, но и жидкое топливо — нефть может служить для получения высоких температур. Обычный способ сжигать нефть (керосин) при помощи фитиля, как им пользуются для освещения, непригоден для этой цели: испаряясь от нагревания горящим над фитилем пламенем, столб образующегося керосинового пара

[1]) Надо заметить, что жидкое железо растворяет в себе уголь (3 — 4%), почему получаемый при выплавке продукт — не чистое железо, а чугун; для удаления растворенного в нем углерода и получения стали или чистого железа, чугун подвергают дальнейшей обработке. — *П. Л.*

только своею наружною поверхностью соприкасается с окружающим воздухом и горит здесь в виде синего, несветящего, очень теплого пламени: развиваемое тепло настолько нагревает несоприкасающийся с воздухом пар углеводородов, что он химически разлагается

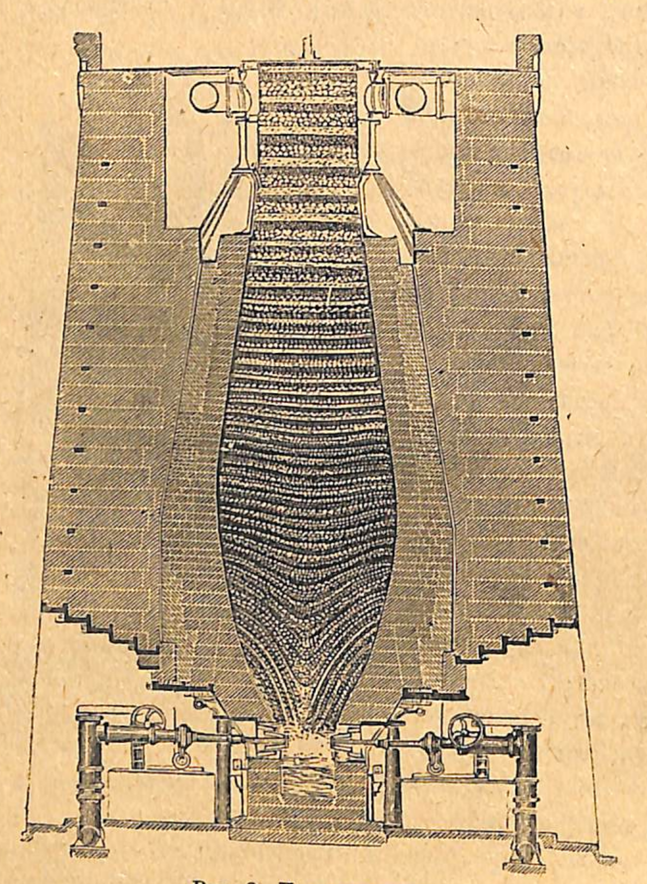


Рис. 2. Доменная печь.

(диссоциирует), при чем выделившийся уголь раскаляется и дает светящую часть пламени, чтобы потом, подымаясь выше, гореть в окружающем его воздухе. Для получения более высокой температуры необходимо ускорить сгорание: это достигается тем, что нефть предварительно распыляется, и затем эта пыль зажигается: каждая пылинка со всех сторон окружена воздухом, содержащим необходимый кислород; благодаря этому, сгорание происходит весьма быстро,

и температура соответственно этому сильно подымается. Для распыления нефти служит пульверизатор (форсунка); струя водяного пара из котла поступает во внутреннюю трубку прибора *a* (рис. 3) и, вырываясь наружу, разбивается в мелкую пыль и увлекает с собою ту нефть, которая поступает в наружную оболочку *b* из нефтяного резервуара; в пламени нефтяной форсунки легко плавится огнеупорный кирпич.

Гораздо более удобным горючим материалом является газообразное топливо; в лабораторной практике пользуются почти исключительно светильным газом [1]), доставляемым городскою газовою

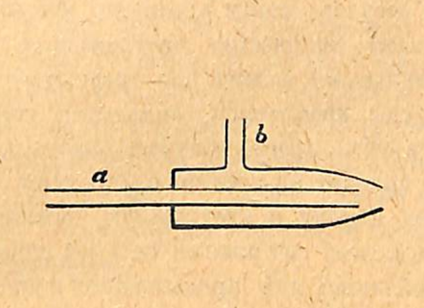


Рис. 3. Схема устройства распылителя для нефти.

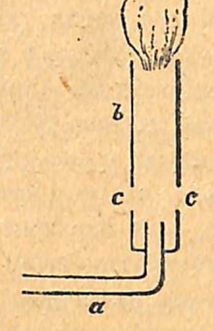


Рис. 4. Схема устройства горелки Бунзена.

канализациею. Чтобы получить высокую температуру, надо газ возможно хорошо смешать с воздухом; это легко достигается следующим простым приемом, указанным знаменитым химиком Бунзеном: вытекающий из трубочки *a* (см. рис. 4) светильный газ попадает в канал *b*, снабженный отверстиями *cc*; быстро протекая мимо этих отверстий, он увлекает с собою прилегающий воздух и внутри канала *b* смешивается с ним; зажигая у верхнего конца вытекающую смесь,

[1]) Светильный газ получается при сухой перегонке каменного угля: каменный уголь помещается в закрытые глиняные реторты и без доступа воздуха подвергается сильному нагреванию; при краснокальной жаре происходит разложение: выходящий из реторты газообразный продукт очищается, собирается в газометры и оттуда поступает в канализационную сеть; в ретортах остается кокс. Светильный газ представляет собою смесь водорода (40%) и газообразных углеводородов. — *П. Л.*

мы получаем несветящее, очень горячее пламя. Убедиться в высокой температуре бунзеновского пламени всего нагляднее можно, внося в него небольших размеров тугоплавкие вещества, которые тотчас же добела раскаливаются: газокалильная горелка Ауэра, которою теперь так часто пользуются для освещения магазинов и улиц, представляет собою не что иное как бунзеновскую горелку, в пламени которой раскаливается тонкая сетка («чулок» Ауэра), сделанная из окислов циркона, лантана и дидима.

Огромное удобство пользования газом для нагревания создало в лабораторной практике целый ряд печей, предназначенных для различных специальных целей, в которых бунзеновское пламя сгорает внутри глиняных (шамотных) сосудов; чтобы увеличить количество выделяемого тепла, увеличивают количество притекающего газа и воздуха, пользуясь побудительными тягами или воздуходувными приспособлениями (мехами): так называемая «паяльная горелка Бунзена», дающая возможность очень просто получать более высокие температуры, по конструкции походит на нефтяную форсунку с тою разницею, что по внутреннему каналу *a* идет воздух, подаваемый мехами, а по наружному *b* подтекает светильный газ; эта паяльная горелка особенно часто употребляется для прокаливания и для приготовления различных аппаратов из стеклянных трубок [1]).

Во всех процессах горения, в которых из экономии пользуются кислородом воздуха, в пламя приходится вводить и азот, объем которого в четыре раза больше объема кислорода: развиваемая в пламени теплота расходуется на совершенно бесполезное нагревание азота, что отзывается и на температуре пламени. Устранить этот охлаждающий фактор не трудно, если пользоваться не атмосферным воздухом, а чистым кислородом, вводя его вместо воздуха во внутренний канал паяльной лампы: при раскаливании в этом пламени известкового цилиндра или пластинки из окиси циркона мы получаем ослепительный свет (Друммондов свет) и можем пользоваться этим источником для проекционного фонаря. Еще несколько более высокую температуру мы получаем, заменяя светильный газ чистым водородом; в этом пламени легко плавится платина и иридий,

[1]) В помещениях, не имеющих газопровода, пользуются парами летучих веществ (например, бензина), смешивая их с воздухом или кислородом; на опасность взрыва и пожара в этих случаях следует обращать особое внимание. — *П. Л.*

чем и пользуются при изготовлении разных аппаратов из этих металлов: получаемая здесь температура доходит до 2500°.

В технике пользование газообразным топливом также распространено с тою разницею, что здесь, вместо дорогого светильного газа, применяют гораздо более дешевый, так называемый, «генераторный газ», получаемый при неполном сгорании топлива [1]) в специально устроенном генераторе. В целом ряде производств, не допускающих копоти в нагревающем пламени и требующих тщательной регулировки температуры (приготовление оптического и других высоких сортов стекол, глазирование фарфора и т. д.), газовое топливо находит себе широкое применение.

До сих пор мы рассматривали химические источники тепла; наивысшая температура, которой мы можем тут достигнуть, обусловливается температурой диссоциации, как было указано выше. В настоящее время лаборатория и техника все шире и шире пользуются другим приемом получения высоких температур, и достижение высшего их предела стесняется здесь только недостаточною тугоплавкостью печей; этот прием заключается в применении электрической энергии к нагреванию.

П. Н. Лебедев [2]).

«Физическое обозрение», *1900*.

Выпрямление наклонных стен.

(Историческая заметка.)

Фундамент здания Музея Искусств и Ремесел в Париже был испорчен до такой степени, что стены главного зала постоянно оседали, выдавались наружу и даже угрожали падением. Наполеон I приказал произвести по этому предмету исследование и представить смету издержек на поправку здания. Комиссия, назначенная для

[1]) При обильном подтоке воздуха происходит полное сгорание и образование углекислоты (CO_2); проходя сквозь слой сильно нагретого угля, лежащий над горящим углем, углекислота раскисляется, соединяясь с новым количеством угля и давая окись углерода (CO); эта последняя и есть «генераторный газ», который в присутствии кислорода воздуха легко окисляется (горит), образуя углекислоту (CO_2). — *П. Л.*

[2]) Петр Николаевич Лебедев (1866 — 1912) — один из крупнейших русских физиков.

этой цели, после тщательных изысканий, решила, что необходимо сломать стены, заложить новый фундамент на 10 футов глубже настоящего и вывести на нем новые стены; расходы на все это должны были простираться на сумму около 10 миллионов франков. Наполеон I нашел, что такая сумма слишком велика, и дело так остановилось. Но когда по прошествии года опять заговорили о том же предмете и представили Наполеону всю опасность, какой могли подвергнуться и жители и посетители здания, если оставить его без исправлений, то Наполеон приказал собрать новую комиссию. Подобно первой, новая комиссия произвела обширные работы, исследовала грунт земли и пришла к заключению, что вовсе не было надобности ломать стены, а достаточно вырыть под каждой стеной 10 колодцев около 40 футов глубиною и, достигнув скалистого грунта, подвести под стены толстые гранитные столбы, на этих столбах утвердить винты, помощью их поднять стены и таким образом сохранить все здание от разрушения. Что же касается до издержек, то, по мнению второй комиссии, поправка обойдется в 9.850.000 франков. Наполеон не удостоил внимания предложение второй комиссии: дело осталось попрежнему нерешенным. Тогда приходит к Наполеону инженер Молар, способный и изобретательный молодой человек, и говорит, что он осматривал повреждения здания и полагает возможным произвести все поправки на десятую часть тех сумм, которые требовали две назначенные комиссии. Подобное предложение поразило всех. Назначенная Моларом сумма была выдана ему, и он немедленно приступил к работе.

Работу свою он начал с того, что в стенах строения, на довольно значительной высоте, приказал просверлить одно над другим два ряда отверстий, величиною в руку. Все с любопытством ожидали, что из этого будет; но когда, спустя несколько недель, из отверстий показались концы толстых железных болтов с весьма крупною винтовою нарезкою, то все, кто ждал от работы Молара хотя какого-нибудь успеха, потеряли всякую надежду; а члены комиссий, которые начинали было сомневаться в правильности своих решений, ободрились. Стянуть дом винтами казалось слишком безрассудно. Откуда взять такую силу, чтобы навинтить гайки, когда этому будет противодействовать тяжесть всего здания? Члены комиссии подсмеивались над Моларом, но он не обращал на это внимания и спокойно продолжал свою работу. К каждому болту был прикреплен якорь о четырех

лапах; средина якоря была очень толста, к концам же он становился тоньше; эти якоря были в состоянии выдержать значительное давление. Под нижним рядом болтов, проходивших через все здание, были устроены большие четыреугольные очаги из листового железа, которые привешивались к болтам на крючках. Назначение очагов было непонятно для всех; между тем на правильную их установку Молар обращал большое внимание.

Однажды утром толпа любопытных заметила рабочих, которые, стоя на легких подмостках, привешенных к выдающимся концам болтов были заняты завинчиванием гаек. Через несколько времени работа прекратилась; рабочие увидели, что невозможно более завинтить гаек, а зрители разошлись с убеждением, что все предприятие имело еще менее прочное основание, нежели исправляемый дом. На следующее утро с удивлением заметили, что гайки всего нижнего ряда болтов ослабели и отстали от стен на целый дюйм; рабочие опять занимались завинчиванием гаек. Это обстоятельство возбудило всеобщее любопытство. На третье утро ослабели все гайки верхнего ряда болтов, и во время их завинчивания можно было видеть, как ослабевали гайки нижнего ряда. Подобная работа продолжалась около 14-ти дней; по истечении их, стены исправляемого здания сравнялись со стенами других строений, и все убедились, что они уже не косы. В самое короткое время стены приняли совершенно вертикальное направление, и улыбавшиеся физиономии членов комиссий сделались очень серьезны, когда они узнали, что посредством неизвестного, но, повидимому, чрезвычайно простого средства достигнуто было то, что они считали почти совершенно невозможным.

Молар пропустил через стены два ряда болтов, а снаружи прижал к стенам якоря, посредством весьма прочных плоских винтов. Когда это было исполнено, то на очагах, под нижним рядом болтов, был разведен огонь, вследствие чего болты нагрелись и сделались *длиннее*. В этом положении болты выдались из стен наружу более, чем прежде, а следовательно гайки могли быть снова навинчены. Это довинчивание гаек и составило работу первого утра. Когда затушили огонь, болты охладились и укоротились именно настолько, насколько они расширились при нагревании; а так как это движение преодолевает большие препятствия, то стены строения сблизились на столько же, на сколько сжались болты. Если бы подобное действие было невозможно, то болты должны были бы разорваться, потому что при охлаждении они

не могут оставаться в расширенном состоянии, в которое приведены были нагреванием. Обратно, если защемить железный болт между двумя стенами или скалами и в этом положении нагреть его, то он или двинет скалы и опрокинет стены, или же согнется сам.

Железные болты, употребленные Моларом, были достаточно прочны: они не разорвались, но *подняли* стены. По этой-то причине верхний ряд болтов выдался из стен; гайки уже неплотно прилегали к ним, и работа второго утра состояла в том, чтобы снова довинтить их. После этого нижний ряд болтов был нагрет вторично. Во время его расширения верхний ряд удерживал стены (иначе они пришли бы в свое первоначальное положение), нижние же болты, сделавшись через нагревание длиннее, дали возможность навинтить гайки еще более. При остывании они постепенно сблизили стены еще на один дюйм, и через это опять ослабили верхний ряд болтов.

Такого рода работа продолжалась часа два каждое утро до тех пор, пока цель была достигнута, — стены подняты, а потом исправлен и самый фундамент. На всю работу употреблено было менее половины выданной Молару суммы. Остальные $^1/_2$ миллиона Наполеон подарил этому искусному инженеру и, кроме того, наградил орденом Почетного Легиона.

Один ряд болтов был оставлен в стенах — может быть, вследствие ненадежности фундамента, или же для воспоминания о способе поправки здания. Этот ряд существует и теперь и служит доказательством того, каких счастливых результатов можно ожидать от разумного применения законов природы.

Задача. Предположим, что болты инженера Молара имели в поперечном сечении 10 кв. см и нагревались на 200° выше первоначальной температуры. Вычислите при этом допущении величину той силы, с какою каждый болт при остывании увлекал стену (см. в вып. I главу «Свойства твердых тел»). *Отв.* Около 40 тонн, или 2400 пуд. — *Сост.*

Тепловое расширение тел.

Тепловое расширение большинства тел весьма значительно. Например, для железа коэффициент линейного расширения приблизительно равен $1{,}1.10^{-5}$. Если сравнить это значение с величиною

модуля растяжения [1]) — 20.000 кгр на кв. мм, то окажется, что для того, чтобы растянуть тело на столько, на сколько оно удлиняется при нагревании на 1° Ц., необходимо приложить к концам его силу в 0,2 кгр на кв. мм = 20 кгр на кв. см. Если тело, подверженное обычным температурным изменениям внешнего воздуха (от — 20° Ц. до + 20° Ц.), прочно закреплено концами и не может расширяться, то в нем возникают напряжения до 300 кгр на кв. см, которые если и не разрушат его, то могут вызвать нежелательные деформации (выпучивание и т. п.) [2]). Поэтому, например, железнодорожные мосты прочно закрепляются только на одном устое, другой же конец свободно катится по каткам, укрепленным на другом устое. Между железнодорожными рельсами оставляются промежутки, рассчитанные на расширение их в жаркое время года [3]). Если трамвайные рельсы и спаивают часто вплотную, то эту операцию производят при средней температуре и, кроме того, закладывая их в грунт, предохраняют от бокового выпучивания.

Большое значение имеет тепловое расширение при точных измерениях и в точных приборах. Здесь пользуются часто телами с исключительно малым коэффициентом расширения: кварцевым стеклом, коэффициент расширения которого всего 3.10^{-7}, и особой никкелевой сталью — и н в а р о м [4]), с коэффициентом расширения 9.10^{-7} и до $1{,}5.10^{-7}$. Вследствие малости коэффициента расширения кварцевое стекло оказывается чрезвычайно устойчивым против температурных изменений; его можно опустить в воду в раскаленном состоянии,

---

[1]) О модуле растяжения — см. выпуск I.

[2]) Деформацией наз. изменение формы или объема тела (см. вып. I). — *Сост.*

[3]) *Упражнения.* Для рельсов длиною 28 футов оставляют между стыками промежуток, который при 0° равен $^1/_4$ дюйма. Принимая коэффициент расширения рельсовой стали равным 10—5 (т.-е. 0,00001), вычислите, насколько должны нагреться рельсы, чтобы свободный промежуток между ними совершенно закрылся? *Отв.:* около 71°. — Какой ширины будет этот промежуток при морозе в 25° Ц.? *Отв.:* около $^1/_3$ дюйма. *(А. В. Цингер.)* — *Сост.*

[4]) Содержит около 36% никкеля; слово «инвар» означает «неизменный». Весьма малым коэффициентом расширения обладает также дерево, — но только по направлению волокон: поперек волокон дерево расширяется гораздо значительнее: так, коэффициент расширения дубовой древесины поперек волокон 54 миллионных, а вдоль волокон — только 5 миллионных. Поэтому дерево часто применяется при изготовлении маятников к стенным часам. — *Сост.*

не вызвав таких натяжений, которые произвели бы растрескивание его, что, наоборот, совершенно неизбежно при обыкновенном стекле с коэффициентом 9.10^{-6}.

Акад. *А. Ф. Иоффе.*

«Курс молекулярной физики», 1919.

Примечание. Сила теплового расширения жидкостей. Нетрудно вычислить силу, с какою расширяется от теплоты жидкость, если узнать величину ее объемного сжатия под механическим давлением.

Известно из опытов, что, например, ртуть всесторонним давлением в 1 атмосферу уменьшается на 3 миллионных доли своего первоначального объема. Так как коэффициент расширения ртути = 0,00018, то при нагревании от 0° до 100° ртуть стремится расширяться на 0,018 своего объема, и чтобы воспрепятствовать этому расширению, потребуется внешнее давление в 0,018 : 0,000003 = 6000 атмосфер, или 6000 кг на кв. см (около 370 пудов). — *Сост.*

История термометра.

I.

Изобретение первого термометра—как мы сейчас увидим, не заслуживающего этого названия, — приписывается великому итальянскому ученому Галилею, который в 1597 г. построил прибор, состоящий из шарика с трубкой, содержавших воздух, отделенный от наружного воздуха каплей воды. При изменении температуры эта капля перемещалась в ту или другую сторону. По двум причинам такой прибор не может быть назван термометром. Заметим, прежде всего, что между физическими приборами существует большое число таких, названия которых оканчиваются слогом «метр», — например: термометр, барометр, гигрометр (измеряет влажность воздуха), гальванометр и т. д. Существуют другие приборы, название которых имеют на конце слог «скоп», — например: термоскоп, бароскоп, гигроскоп, гальваноскоп и т. д. Из них первые дают возможность более или менее точно измерить соответствующую физическую величину, между тем как вторые только указывают, что физическая величина изменилась в ту или другую сторону; они, пожалуй, еще дают возможность сказать, которое из двух изменений больше, но ни о каком точном сравнении, ни о каком изменении речи не может быть. Ясно, что прибор Галилея в крайнем случае мог бы быть назван термоскопом. Необходимо, однако, прибавить, что и при неизменной температуре капля воды в трубке должна была смещаться в ту или другую сторону в зависимости от изменения атмосферного давления (открытого только в 1643 г.), так что прибор мог служить и бароскопом. Ясно, что его показания, зависящие от двух причин, от температуры и от барометрического давления, даже не могли всегда правильно указывать на направление, в котором меняется температура. Удивительно, что Герике, изобретатель воздушного насоса, построил около 1660 г. совершенно такой же прибор с воздухом, хотя он знал об изменениях атмосферного давления и не мог не понимать их влияния на показания его прибора.

Кто первый устроил термометр с жидкостью — определить трудно. Бельгиец Гельмонт (1577 — 1644) пользовался водяным термометром, но без шкалы. В 1641 г. вода впервые была заменена спиртом, как утверждают, по предложению герцога Фердинанда II (1621 — 1670) во Флоренции. Таким термометром пользовались члены знаменитой Флорентинской академии, существовавшей всего только десять лет (1657 — 1667). Конец трубки был закрыт, а из трубки воздух был выгнан; на трубке находилась настоящая шкала, но градусы отмечались не черточками, как это делается ныне, а маленькими стеклянными пуговками, весьма искусно припаянными к трубке. Число градусов колебалось от 50 до 400; различные шкалы почти не могли быть сравниваемы между собою. Постоянными точками служили: наибольший зимний холод и наибольшая летняя жара во Флоренции.

Еще в 1701 г. Ньютон пользовался термометром, наполненным льняным маслом.

Французский ученый Амонтон построил (1703) воздушный термометр, в котором, однако, температура измерялась не объемом, но давлением воздуха и в котором одной из постоянных точек служила температура кипения воды.

Правильная термометрия была основана трудами французского ученого Реомюра (1683 — 1757), немецкого Фаренгейта (1686 — 1737) и шведского Цельсия (1701 — 1744).

Из них Фаренгейт первый стал приготовлять спиртовые термометры, показания которых были одинаковы, что представляло огромный шаг вперед и вызвало величайшее удивление его современников. Около 1715 г. он заменил спирт ртутью и принял за постоянные точки температуру тающего льда (32° Ф.) и температуру тела здо-

рового человека (96° Ф.). Первые его термометры не доходят до температуры кипения воды, о которой он, однако, в 1724 г. говорит, что она находится у 212° Ф. Неизвестно, пользовался ли он этой температурой для определения постоянной точки на самих термометрах.

Реомюр описал в 1730 г. свой термометр, который был наполнен спиртом и в котором впервые шкала была построена на температурах таяния льда и кипения воды, как на двух постоянных точках, расстояние между которыми он разделил на 80 градусов. Делюк заменил спирт в этих термометрах ртутью. Цельсий построил свой ртутный термометр около 1742 г.; он разделил промежуток между теми же двумя постоянными точками на 100°, при чем он температуру кипения воды принял за 0°, а температуру таяния льда за 100°. По предложению Штремера (1707 — 1770), эти числа были переставлены.

Проф. *О. Д. Хвольсон.*

«Физика и ее значение для человечества», 1921.

II.

Термометр, без сомнения, есть одно из чудесных изобретений современной [1]) физики, которое в свою очередь много содействовало ее успехам. Он нам доставил большое число интересных знаний, которые были бы недостижимы без его помощи. Как мы во многих случаях могли бы без термометра узнать, что жидкости (некоторые), смешанные между собою, нагреваются? Без термометра мы никогда не открыли бы, что при растворении известных солей происходит охлаждение, а также при каких солях это охлаждение обнаруживается наиболее сильно. Мы не могли бы также узнать, что один кусок льда может быть холоднее другого. Мы также не могли бы открыть, что кипящая вода имеет температуру, выше которой вода вообще не может быть нагрета [при нормальном давлении].

Все физики знают, что с термометром в руках можно произвести бесчисленные опыты. Но в этом приборе нуждаются не одни физики; применение его не ограничивается лабораториями — мы обычно узнаем по термометру, какова температура воздуха...

До сих пор [т.-е. до 1730 г.] термометры почти совсем не употреблялись для определения наибольшего холода или жара в различных

[1]) Писано в 1730 г.

климатах — вопросов большой пользы и интереса. А между тем таким образом легко узнать, сколько градусов тепла или холода может выдержать человек. Столь же важно было бы знать, в каких температурах нуждаются для произрастания те растения и деревья, которые могли бы у нас акклиматизироваться.

Реомюр.

«Об устройстве термометров», 1730.

III.

Самый удобный способ для нанесения градусов на термометре есть, по моему мнению, тот, при котором отмечаются две точки, а именно: одна, при которой вода кипит, другая, при которой начинает замерзать. По этим точкам и следует отмечать градусы.

Что касается точки замерзания, то Реомюр находил ее даже в теплую погоду при помощи искусственно вызванного холода [охлаждающей смеси]. Другие брали теплую воду и зимой выставляли ее на холод, оставляя в ней термометр до тех пор, пока она не начинала замерзать и покрываться с поверхности ледяною коркою. Этот способ может считаться, при осторожном пользовании, удовлетворительным. Но я убедился, что всего удобнее пользоваться тающим снегом и вставлять в него термометр, по крайней мере, на полчаса; ибо неоспоримо, что вода имеет одну и ту же степень холода, начинает ли она замерзать или начинает лед таять.

Свои опыты я производил в течение двух лет во все зимние месяцы при всякой погоде, при переменах барометрического давления и всегда находил одну и ту же точку таяния льда на термометре. И я не только поступал так, как Ньютон, вставлявший термометр в тающий снег, — я брал во время сильного мороза холодный снег, приносил его в свою комнату и оставлял на огне до тех пор, пока он не начинал таять. Я брал также котел с тающим снегом и помещал его со вставленным в этот снег термометром в натопленную печь; при этом я всегда находил, что термометр все время, пока был плотно окружен снегом, указывал одну и ту же точку.

Что касается другой постоянной точки, то достаточно хорошо известно, что вода не может нагреться выше известной степени. Раз она начала кипеть, то в продолжение всего времени ее кипения ртуть в термометре остается у одной и той же точки.

Однако, Фаренгейт заметил, что точка, около которой останавливается ртуть термометра, когда вода кипит, находится в некоторой зависимости от высоты ртути в барометре. Я также заметил это удивительное явление; наблюдая положение этой точки при различных стояниях барометра, я нашел, что указания Фаренгейта были совершенно справедливы.

Если, следовательно, желательно, чтобы точка кипения воды оставалась постоянною, то для этого необходимо определить то известное стояние барометра, с которым эта точка связана. Так как, согласно наблюдениям в Швеции и других странах Европы, средняя высота барометра равна 25 дюймам (старинным) и 3 линиям, то всего лучше считать точкой кипения воды ту точку, которую указывает термометр, когда вода кипит при только что приведенной высоте барометра.

Когда найдены обе названные точки (таяния льда и кипения воды), лежащие в чувствительном термометре на довольно значительном друг от друга отдалении, то всего лучше обозначить градусы так, как это будет приведено дальше; при этом можно будет иметь уверенность в том, что различные термометры в одной и той же среде будут показывать одно и то же число градусов и что термометр, приготовленный, например, в Париже, будет показывать то же число градусов, как и термометр, изготовленный в Упсале.

1. Шарик термометра вставляют в тающий снег и точно отмечают точку замерзания воды.

2. Затем отмечается точка кипения воды при высоте барометра в 25 дюймов и 3 линии.

3. Пространство между этими двумя точками делится на 100 равных частей, или градусов. Если эти деления продолжать еще ниже точки замерзания воды, то термометр готов.

Цельсий.

«Наблюдения над двумя постоянными точками термометра», 1742.

Примечание. Положение нулевой и сотой точки в термометре Цельсия было первоначально обратно современному (см. первую статью): точка замерзания обозначалась 100°, а точка кипения 0°; таким расположением Цельсий желал избежать отрицательных чисел для обозначения низких температур. Но уже спустя восемь лет шведская Академия придала шкале тот вид, какой она имеет теперь.

Вопросы. Как выражалась на первоначальной шкале Цельсия температура, обозначаемая нами теперь 37° Ц.? Температура замерзания ртути? Какому современному обозначению соответствует 37° первоначальной шкалы Цельсия? 130°? $1\frac{1}{2}$°? — *Сост.*

Устройство термометра.

Термометры имеют очень различное устройство. Их общая сущность состоит в том, что некоторое свойство какого-либо тела изменяется с температурой, и величина этого изменения служит для измерения последней. Таких свойств, которые изменяются со степенью нагретости тел, очень много, — можно даже сказать, что сюда относятся все свойства вещества; однако, для устройства термометра не все из них одинаково удобны.

До сих пор наиболее удобными для измерения температуры оказались изменения:

1) объема жидких тел,

2) длины твердых тел,

3) так называемой, упругости или давления газообразных тел,

4) изменение способности пропускать электрический ток (так называемой, электрической проводимости) у некоторых металлов и

5) наконец, возникновение электрического тока при подогревании места спая двух металлов.

Старейший и наиболее употребительный род термометров — это термометры, основанные на изменении объема жидких тел от температуры. Большинство жидкостей с увеличением температуры увеличиваются в своем объеме, т.-е. расширяются, а при уменьшении температуры сжимаются. Для того, чтобы заметить это расширение и сжатие, жидкость должна быть помещена в сосуд, снабженный по возможности узким горлом, даже лучше тонкой трубочкой. Трубочка может быть оставлена открытой или сверху запаяна — это безразлично, лишь бы было достаточно места для расширения жидкости. Такого рода приборчик представляет собою уже некоторый грубый термометр. Дальнейшее будет лишь усовершенствованием его. Во-первых, очевидно, чем больше резервуар и чем тоньше трубка, тем заметнее будет изменение объема с температурой, т.-е. тем чувствительнее будет наш термометр. Затем ясно, что точность, с которой мы можем отметить положение конца столбика жидкости, будет только в том случае полной, когда жидкость, налитая в сосуд, не смачивает стенок трубки. В самом деле, пусть жидкость смачивает трубку (пристает к ее стенкам, как, например, вода, керосин), и пусть ее конец находится при известной температуре в точке *a*. При нагревании жидкость расширится,

и ее конец дойдет, положим, до b; пусть теперь жидкость опять охладится; тогда конец ее опять опустится, но уже очутится ниже a, так как часть жидкости останется прилипшей к стенкам в промежутке между a и b. Ничего этого не будет, и при охлаждении до прежней температуры конец столбика жидкости будет всегда возвращаться на прежнее место, если жидкость не прилипает к стенкам трубки.

Так как трубка, очевидно, должна быть прозрачной для того, чтобы можно было видеть положение конца колонки жидкости, и так как таким прозрачным веществом является почти исключительно стекло, то по необходимости в качестве жидкости, не пристающей к стеклу, приходится брать ртуть, хотя она во многих отношениях и менее удобна, чем другие жидкости. В самом деле: 1) ее расширяемость сравнительно не велика [1]); 2) ее вес очень большой, благодаря чему является неудобным изготовление термометров с очень большим резервуаром, ибо они становятся в этом случае очень ломкими; 3) ртуть замерзает при — 32°R., почему ртутными термометрами нельзя пользоваться для измерения очень низких температур [2]).

В окончательном виде термометр представляет собой небольшой стеклянный резервуар от $^1/_4$ до 3 куб. сантиметров вместимости (только в редких случаях объем резервуара доводят до 7 куб. см), к которому припаяна очень тонкая (капиллярная) трубка. Эта трубка бывает двух родов: или с очень толстыми стенками, так что она имеет вид скорее стеклянной палочки с очень тонким каналом посредине, или со стенками не такими толстыми: в этом случае вся трубочка является довольно тоненькой.

В первом случае сама трубка образует собою «корпус» термометра, служит поддержкой резервуара и имеет по своей длине выгравированные деления на градусы и их части. Это первый тип термометров (так называемые штаб-термометры).

Во втором случае трубочка сама тонка, и «корпус» термометра образует другая более прочная и широкая трубка, служащая наружной

---

[1]) Ртуть расширяется от теплоты в 5 раз меньше, нежели спирт, и в 10 раз меньше, чем эфир (при температуре 20° Ц.). — *Сост.*

[2]) С другой стороны, ртуть имеет то преимущество над всеми прочими жидкостями, что коэффициент ее расширения почти не изменяется с температурой; кроме того, благодаря высокой теплопроводности и незначительной удельной теплоте ($^1/_{30}$), ртуть быстро принимает температуру измеряемого тела.— *Сост.*

муфтой (или гильзой). Деления в этом типе термометров наносятся на особой стеклянной или бумажной полоске, расположенной позади капиллярной трубочки внутри наружной стеклянной муфты. Сверху эта муфта запаивается или, как, например, в очень употребительных медицинских термометрах, закрывается особой металлической крышечкой, прикрепленной к ней сургучом. Шкала укрепляется внутри муфты также с помощью сургуча.

Третьим типом термометров (впрочем, не претендующих на точные измерения) являются обыкновенные комнатные термометры, у которых деревянная шкала прикреплена снаружи к довольно толстостенной капиллярной трубке термометра.

В термометрах обоих первых типов полезно (чего иногда не делают) устраивать наверху трубки маленькое раздутие, так называемую запасную камеру, в которой могло бы поместиться значительное количество ртути, на случай неумышленного очень сильного нагревания термометра. Обыкновенно при изготовлении термометра воздух из этой камеры, как и из свободной части капиллярной трубки выкачивают. Это делается не потому, чтобы этот воздух мешал расширению ртути, а потому, что ртуть, особенно при высоких температурах, окисляется кислородом воздуха.

Для весьма многих целей вполне достаточно термометра, деленного на градусы (длиною в $^1/_2$ мм каждый). Для более точных измерений пользуются часто термометрами, деленными на $^1/_{10}$ долю градуса. Наконец, для еще более точных работ, особенно для измерений количества тепла, пользуются термометрами, деленными на $^1/_{50}$ долю градуса, при расстоянии между делениями до $^3/_4$ мм; эти последние расстояния легко на глаз разделить еще на десятые доли, так что с помощью такого термометра можно измерять температуру с точностью до $^1/_{500}$ или 0,002 долей градуса [1]). Это почти предел, которого можно достигнуть с ртутными термометрами.

А. Щукарев.

«Курс молекулярной физики», 1910.

---

[1]) Термометры, показывающие десятые и более мелкие доли градуса, устраивают не с полной шкалой, а лишь с определенной частью ее (иначе термометр был бы непомерно длинен), так что для всевозможных измерений необходимо располагать набором из многих термометров с различными частями полной шкалы.

Обычный ртутный термометр не пригоден для измерения очень высоких и очень низких температур, так как ртуть в пустоте кипит около 250° и замерзает при — 40° [1]). Поэтому для очень низких температур употребляют термометры с толуолом или пентаном — жидкостями, трудно замерзающими [пентан замерзает при — 200°]. В термометрах для высоких температур пространство над ртутью заполняют азотом. При повышении температуры столбик ртути сам сжимает газ, и вследствие созданного этим давления кипение ртути задерживается. Такие термометры нельзя, однако, употреблять выше 550°, так как тогда стекло начинает размягчаться, и термометр гибнет. Заменяя стекло плавленным кварцем, удалось приготовить ртутные термометры, годные до 750°. В них давление доходит до 50 атмосфер, и повышать его еще далее было бы небезопасно для прибора. Однако, необычайная тугоплавкость кварца весьма затрудняет и удорожает производство таких термометров.

К. Леонтьев.

«Температура и ее измерение», *1918.*

Тепловое расширение воды.

В XVIII столетии был найден поразительный факт, что вода при температуре около 4°Ц. представляет наибольшую плотность, т.-е. данная масса ее при 4° занимает наименьший объем; или, иными словами: жидкая вода от 0° при нагревании до 4° Ц. не расширяется, а сжимается, и только после этой температуры с нагреванием увеличивает свой объем, в отличие от всех почти других жидкостей, постоянно расширяющихся при нагревании.

Всякая вода, содержащая что-либо в растворе, сильнее расширяется, чем чистая, и чем более веществ растворено в воде, тем ее расширение значительнее, — как видно из имеющихся данных для разных сортов морской воды.

В природе изменения плотности и объема воды имеют весьма большое значение. Вода водоемов охлаждается с поверхности от лучеиспускания, нагревается также с поверхности — от солнечной теплоты,

---

[1]) Точнее при — 39° Ц. Это открытие сделано было русским академиком Брауном в сильные холода зимы 1759 г. — *Сост.*

слои же воды располагаются по относительной своей плотности. Пока вода нагрета до температур высших, чем 4° Ц., верхние слои будут теплейшими, как это и видим в нормальных условиях; но если охлаждение достигает 4° Ц., то нижние слои будут теплее верхних, потому что при охлаждении плотность уменьшается. Следовательно, на поверхности воды достигается 0°, или температура замерзания, ранее, чем на дне водоема. Поэтому лед образуется в водоемах с поверхности, а не со дна или не с середины воды, как и видим в природе. Плавает лед по поверхности воды по той причине, что он легче, чем вода при 0°.

Воды соленые, например, морская вода, имеют также свою температуру наибольшей плотности; она, как и температура образования льда у такой воды, лежит немного ниже, чем у чистой воды. На дне океанов всюду, даже под экватором, хотя на различных глубинах, лежит слой такой тяжелейшей воды, притекающей от полюсов по дну, чем определяется уменьшение температуры воды в океанах по мере углубления.

Так как вес кубической меры или удельный вес воды изменяется с температурой и с соленостью и так как соседние воды разной плотности (т.-е. разной температуры и солености) смешиваются лишь медленно, то от этого зависит распределение воды разной плотности — внизу более холодной или более соленой, а сверху более теплой или менее соленой — на разных глубинах морей и океанов и те течения в океанах и морях, которые Мори [1]) живо описал, как реки среди океанов (например, Гольфстрем, несущий из тропиков теплую воду к западным берегам Европы). Этими течениями, — идущими как по поверхности, так и по дну, а иногда и в средней толще воды, — воды разных плотностей стремятся достичь устойчивого равновесия; а потому, например, от полюсов по дну океана текут потоки холодной и тяжелой воды, а по поверхности океанов — морские течения теплой воды от тропиков в средние широты. Прилив пресной воды, неравномерность глубины, ветры, очертания берегов и другие обстоятельства сильно влияют на направление этих путей. Адмирал Макаров [2]), исследовав многие подобные течения, установил и ту разность высот различных морей, которая происходит от этой разности плотностей

---

[1]) Выдающийся американский ученый (1807 — 1873). — *Сост.*

[2]) Известный русский исследователь морей и флотоводец (1848 — 1904).

воды различных морей, хотя бы и сообщающихся друг с другом. Так, например, уровни Черного, Балтийского и Бискайского морей не вполне одинаковы. Отсюда уже видно, что данные для плотности воды играют важную роль в учениях, касающихся равновесий и движений воды на Земле.

Д. И. Менделеев [1]).

«Новый Энциклопедический словарь».

Примечание. Вода—не единственное тело в природе, расширяющееся при охлаждении в определенном температурном промежутке. Подобная же особенность замечена также у *алмаза* и *смарагда*, температура наибольшей плотности которых равна соответственно *минус* 42,3° и *минус* 4,2°. Кристаллическое иодистое серебро увеличивает свой объем от охлаждения уже при комнатной температуре. — *Сост.*

Водяной термометр.

Термометр, наполненный водой, вместо ртути, представляет интересные особенности. Погрузим его в тающий лед и отметим уровень воды чертою 0°, тогда *при охлаждении* — вода расширяется [2]), а резервуар сжимается, вследствие чего уровень все более и более *поднимается.* Если же мы будем *нагревать* аппарат от 0°, то стекло будет расширяться, а вода сжиматься; следовательно, уровень будет понижаться. При + 4° вода займет наименьший объем, а истинный коэффициент ее расширения станет равным почти нулю; но так как коэффициент расширения стекла почти постоянен, то его влияние окажется преобладающим, и при дальнейшем повышении температуры уровень *будет продолжать опускаться* до тех пор, пока коэффициент расширения воды не сравняется с коэффициентом расширения стекла, — что в действительности имеет место около 6°. При этой температуре уровень достигает наинизшего положения, т.-е. вода займет *наименьший видимый объем.*

[1]) Дм. Ив. Менделеев — знаменитый русский ученый, химик и физик (1834—1907).

[2]) Вода *продолжает расширяться при понижении температуры ниже нуля,* если только остается жидкой, — как показали опыты Депре, при которых прокипяченная вода была заключена в термометрический сосуд и могла быть охлаждена, не замерзая, до — 20° Ц. Лед при охлаждении ниже нуля сжимается.—*Д. Л.*

При дальнейшем нагревании расширение воды берет перевес, и при + 8° уровень становится на том же месте, где он был при + 3°; при + 11° он становится на том же месте, где был при 0°; при + 15° — на том же, как при — 3° и т. д. Следовательно, одно и то же показание водяного термометра будет соответствовать двум различным температурам.

Температура наибольшей плотности свойственна, кроме воды, также водяным растворам и некоторым другим телам, например, висмуту, чугуну и т. п. Наибольшая температура водных растворов не всегда может быть наблюдаема непосредственно, потому что для них температура плотности часто лежит ниже температуры замерзания; следовательно, при обыкновенных условиях они замерзают раньше, чем достигнут наибольшей плотности. Так, например, морская вода замерзает приблизительно при — 1,8°, а наибольшая плотность ее наступает при 3,6°.

Д. А. Лачинов.

«Лекции физики», 1901.

II. Количество теплоты.

Теплоемкость воды.

У разных веществ существует совершенно различное взаимоотношение между повышением температуры и количеством израсходованного на это тепла, т.-е. между теми разнородными величинами, из которых первая измеряется термометром, вторая—калориметром. Одни тела для повышения температуры на 1° требуют большего притока тепла, другие довольствуются малым количеством. Количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1°, называется **теплоемкостью** этого тела, а если речь идет об **одном грамме** вещества, то — **удельною** теплоемкостью данного тела (на практике, вместо грамма, берут килограмм). Эта удельная теплоемкость у одних тел велика, у других мала и, разумеется, должна быть выражаема в каких-нибудь единицах; теплоемкость какого-нибудь тела должна быть принята за единицу, и выбор пал на *воду*, как и при определении единицы удельного веса.

Итак, удельная теплоемкость воды принята равной единице, а теплоемкость остальных тел выражается в долях этой единицы. Тут обнаружилось нечто удивительное. Среди большинства тел (теплоемкость которых варьирует незначительно) вода обладает наибольшею теплоемкостью; лишь немногие приближаются к ней, да и из них ближайшие обладают теплоемкостью в 5, в 10, в 20 и 30 раз меньшею, чем вода. С этой особенностью воды приходится часто сталкиваться в технике и в домашнем обиходе — иной раз к выгоде для нас, иной раз к ущербу, чаще же одновременно и к выгоде и к ущербу. Для примера упомянем лишь о водяном отоплении, где весьма медленное нагревание и столь же медленное остывание (т.-е. долгое сохранение тепла) обусловлено большой теплоемкостью воды. Что же касается

варки пищи, то будь у нас выбор между несколькими жидкостями, мы без сомнения избрали бы не воду, которая требует для своего нагревания всего больше времени, всего больше энергии и, следовательно, обходится всего дороже. Почему вода обладает наибольшею теплоемкостью, мы не можем составить себе сколько-нибудь удовлетворительного представления [1]).

Раньше мы привели такое определение: удельная теплоемкость есть количество теплоты, необходимое для нагревания 1 грамма вещества на 1°. При этом молчаливо предполагалось, что совершенно безразлично, происходит ли повышение температуры от 0° до 1°, или от 15° до 16° (комнатная температура) или в каком-нибудь другом температурном промежутке. Однако, это вовсе не так: теплоемкость у всех тел не остается неизменной при всякой температуре, а часто значительно меняется, притом так, что — за двумя исключениями — с повышением температуры возрастает и теплоемкость. Эти два исключения составляют ртуть и вода. У ртути это явление весьма просто: с возрастанием температуры теплоемкость падает. У воды же оно много сложнее: ее удельная теплоемкость от 0° и приблизительно до 27° постепенно падает, достигает здесь своего минимума и затем начинает возрастать. Правда, изменение теплоемкости воды не так уж значительно, но все же оно ясно выступает и поддается точному учету.

Это обстоятельство значительно усложнило весьма важную в практическом отношении задачу установления истинной единицы удельной теплоемкости, т.-е. **калории**. Для этого можно было бы взять количество теплоты, потребное для нагревания 1 грамма воды от 0° до 1° или от 15° до 16°, — но эти количества можно определить только косвенным путем, потому что в таком маленьком температурном промежутке невозможно сделать непосредственные точные измерения. Всего лучше взять весь промежуток от 0° до 100°, в котором вода при нормальных условиях остается жидкой, и полученное измерением количество теплоты, деленное на 100, даст среднюю теплоемкость в этом промежутке. Впрочем, недавно выяснилось, что полученная таким путем удельная теплоемкость весьма мало отличается от теплоемкости при комнатной температуре, и потому, по международ-

[1]) Большею, чем вода, теплоемкостью отличаются только гелий (1,45) и водород — 3,4 в газообразном состоянии и 6,4 в жидком. — *Сост.*

ному соглашению, она принята за единицу количества теплоты — калорию.

Как сказано было выше, удельная теплоемкость воды необычайно велика по сравнению с другими телами. Но имеется вещество, к которому на первый взгляд это не относится, так как оно родственно воде, вернее, так как оно есть та же вода, только в другом состоянии, а именно — *лед*. Однако, вопреки ожиданиям, лед имеет значительно меньшую теплоемкость, нежели вода, — почти вдвое. То количество теплоты, которое нагревает на 1° один грамм воды, нагревает два грамма льда. Это наблюдается даже в том случае, когда оба тела — и грамм воды и грамм льда — имеют одну и ту же начальную температуру, например, 0°, и одну конечную, например, 1°. Так велико различие в явлениях при столь близком родстве вещества!

Ф. Ауэрбах.

«Семь аномалий воды», 1912.

Тепловой баланс самовара.

Предпримем исследование теплового баланса самовара, т.-е. определим, сколько при его нагревании тратится тепловой энергии на согревание воды от комнатной температуры до кипения и сколько теплоты теряется: часть утекает в трубу, часть идет на нагревание стенок самовара, часть расходуется лучеиспусканием (последняя потеря так мала, что если самовар поспевает быстро, то ею можно пренебречь без большой погрешности).

Предположим, что мы ставим самовар на березовом угле, «теплотворная способность» которого составляет 7000 калорий, т.-е. один грамм угля, сгорая вполне, способен за счет выделяющейся теплоты повысить температуру 7000 граммов воды на 1° Ц., или 700 граммов на 10° Ц. и т. д., считая, что вся освобождающаяся теплота идет лишь на нагревание воды. Прежде всего мы взвешиваем самовар без воды. Пусть он весит 6500 граммов. Удельная теплота вещества самовара (латуни)=0,09. Взвешиваем влитую воду; вес ее 3750 граммов. Пусть начальная температура самовара и воды 8° Ц. Отвешиваем определенное количество углей, — например, 308 грамм. Ставим самовар, сжигая вначале маленький пучок лучинок (количеством даваемых ими калорий можно пренебречь). Затем сыплем угли, даем им разгореться и, как только самовар закипит, тотчас же снимем

трубу и заглушим самовар, надев на него колпачок. Это нужно для того, чтобы вытряхнуть после из самовара не успевшие сгореть угли, взвесить их и таким образом узнать, сколько сгорело углей. Пусть сгорело 167,5 грамма. Отсюда мы получаем данные для расчета и для определения «коэффициента полезного действия» самовара.

Итак, углей сгорело 167,5 грамма; они освободили $7000 \times 167{,}5 = 11725000$ мал. калорий. Вода нагрелась от 8° до 100°, т.-е. на 92°. Воды было 3750 граммов, следовательно, она поглотила $3750 \times 92 = 345000$ м. калорий. (Вещество самовара, 3750 граммов латуни, нагрелось также на 92°, для чего потребовалось $3750 \times 92 \times 0{,}09 = 3115$ м. калорий; эта часть теплоты углей была израсходована бесполезно, так как наша цель в данном случае— иметь горячую воду.) Таким образом, коэффициент полезного действия самовара $= \frac{345000}{11\ 725000} = 29\%$.

Ф. Н. Красиков.

«Жилище, как тепловая лаборатория», 1923.

Медный и фарфоровый чайник.

У нас имеются два чайника, вмещающие по 500 граммов воды. Один сделан из тонкой меди и весит только 150 граммов, другой — тяжелый фарфоровый и весит 300 граммов. Чай, как известно, хорошо заваривается только в кипящей воде. Но когда мы наливаем в чайник воду, нагретую до 100°, то часть теплоты воды поглощается стенками чайника. На сколько же понизится вследствие этого температура воды в наших чайниках?

Удельная теплота меди = 0,095; значит, чтобы нагреть наш медный чайник, весящий 150 граммов, на 1°, требуется $150 \times 0{,}095 = 14$ мал. калорий; а чтобы нагреть его от комнатной температуры 15° до точки кипения, требуется $85 \times 14 = 1190$ мал. калорий. Наша вода должна при этом столько же калорий потерять, а так как воды у нас 500 граммов, то, потеряв 1190 калорий, она остынет на $1190 : 500 =$ около 2,4 градуса. Следовательно, температура воды, налитой в медный чайник, понизится до 97,6°.

Удельная теплота фарфора = 0,2. Поэтому, чтобы нагреть наш фарфоровый чайник на 1°, требуется $300 \times 0{,}2 = 60$ мал. калорий. Чтобы поднять температуру этого чайника на 85°, потребуется $85 \times 60 = 5100$ мал. калорий. Столько же калорий должна потерять вода,

а так как ее имеется в чайнике 500 граммов, то она охладится при этом на 5100 : 500=около 10°, и, значит, будем иметь температуру 90°.

Отсюда ясно, что в нашем медном чайнике чай должен лучше завариваться, нежели в фарфоровом. Однако, этот недостаток фарфорового чайника легко устранить; для этого достаточно чайник предварительно нагреть — и тогда фарфоровый чайник будет иметь даже преимущество перед медным: так как фарфор хуже проводит тепло, чем медь, то в фарфоровом настой дольше останется горячим.

Л. Пфаундлер.
«Физика обыденной жизни».

Упражнения. Вполне ли точен приведенный здесь расчет? Какое обстоятельство здесь не было принято во внимание? Проделайте вычисление более точно (правильный ответ: 97,7° и 90,9°). — Почему советуют, прежде чем заварить чай, сполоснуть чайник горячей водой? — Почему второй стакан чаю нередко бывает более горяч, чем первый? *Сост.*

Печи и отопление.

В печках, отапливаемых твердыми горючими веществами, приходится позаботиться о достаточном притоке воздуха. В большинстве случаев это достигается всасывающим действием печных труб. Газы, образующиеся в виде продуктов сгорания, вследствие своей высокой температуры легче атмосферного воздуха; поэтому они с довольно значительной силой вытесняются вверх по печной трубе, и эта сила тем больше, чем выше температура газов и чем длиннее труба. Но именно поэтому приходится жертвовать частью, образующейся от сгорания теплоты, которая для самого отопления пропадает. Чтобы не тратилось на это больше теплоты, чем требуется, надо заботиться о том, чтобы тяга воздуха была не больше той, какая необходима для процесса сгорания. Слишком сильная тяга влечет за собою не меньше бесполезных потерь, чем чересчур слабая.

Далее, нужно заботиться о том, чтобы всасываемый воздух не проходил в трубу бесполезно, мимо горючего вещества, а соприкасался с ним возможно теснее. Это достигается надлежаще устроенными дверцами и решеткой для огня.

Рассмотрим условия горения в простейшей комнатной печке. На рис. 5 изображена печка (железная) самого простого устройства. Она состоит из помещения для топки цилиндрической или призматической формы, с дверцей *H* и из вытяжной трубы *C*, соединяющей

это помещение с дымовой трубой *K*. Огонь, разведенный на дне этого помещения (топливника), быстро нагревает находящийся там воздух, который поднимается в дымовую трубу; через открытую дверцу топливника всасывается свежий воздух. Из этого воздуха незначительная часть проникает внутрь костра, а большая часть, вместе с газообразными продуктами горения, поднимается в дымовую трубу. Обуглившиеся куски дерева, зарытые в золу, не могут сгореть полностью: на дне топливника нет решетки, и потому нет притока воздуха снизу. В этом случае не удается использовать всю теплоту, которую горение могло бы дать; кроме того, дымовая труба нагревается больше, чем сама

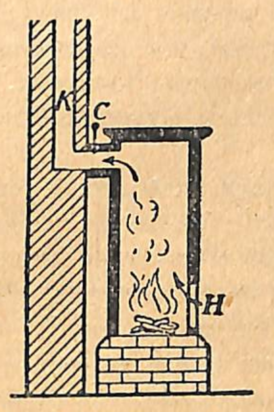


Рис. 5. Схема устройства железной печки.

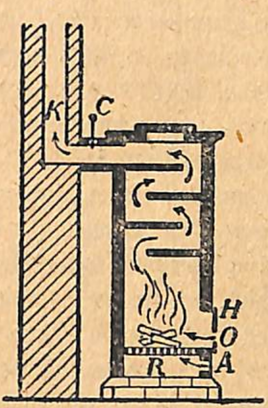


Рис. 6. Печь с дымооборотами.

комната. Стенки печки быстро охлаждаются с внутренней стороны чрезмерной тягой воздуха. Этому можно бы помешать помощью заслонки в *C*, но тогда возникнет нечто худшее; вследствие недостатка кислорода, необходимого для полного сгорания топлива в углекислый газ, образуется ядовитая окись углерода, которая, проникая через щели топочных дверец в комнату, может создать большую опасность для здоровья и жизни ее обитателей.

На рис. 6 изображена печка, свободная от этих недостатков. В ней газы, прежде чем попасть в дымовую трубу, должны пройти длинный путь внутри самой печи, отдавая ей значительную часть своей теплоты. Уже этим предупреждается чрезмерная тяга воздуха. Топочная дверь *H* закрыта, и остается открытым лишь маленькое отверстие *O*, достаточное для пропуска нужного количества воздуха. Вследствие незначительных размеров этого отверстия, воздух вры-

вается в него с большой скоростью и прямо направляется на пламя; поэтому *мимо* огня проходит весьма мало воздуха. Когда пламя гаснет, и в печке остаются лишь раскаленные уголья, закрывают и это отверстие. Тогда воздух проникает в топливник только через дверцу *A* ниже решетки *R*; попадая далее через эту решетку под раскаленные уголья, он обусловливает их полное сгорание; пепел через решетку ссыпается вниз, обнажая уголь для непосредственного соприкосновения с воздухом. Чтобы совершенно закрыть печку, закрывают обе дверцы, — но не верхнее отверстие у *C*; раз дверцы закрыты, то образующаяся окись углерода проникнуть в комнату не может.

Чем суше дерево, тем больше теплоты выделяет оно при сгорании. Это происходит по двум причинам: во-первых, чем дерево суше, тем в нем больше (относительно) горючего материала; во-вторых, чтобы превратить воду в пар, тратится много теплоты — свыше 600 калорий на килограмм воды [1]).

Количество теплоты, выделяемое одним килограммом горючего материала (так называемая «теплотворная способность» топлива или его «калориметрический эффект), не следует смешивать с высшей температурой, получаемой при горении («пирометрический эффект»). Большей теплотворной способности не всегда соответствует высшая температура пламени. Последняя зависит еще и от того, сколько излишнего воздуха притекает к огню (и охлаждает его). Самые высокие температуры получаются тогда, когда к огню притекает только кислород; азот, смешанный с ним в воздухе, не уменьшает количества образующейся теплоты, но понижает температуру пламени. В прилагаемой таблице приведены теплотворная способность и температура сгорания для каменного угля, кокса и дерева:

Род топлива.	Теплотворная способность.	Температура сгорания: с необходимым количеством воздуха.	с двойным количеством воздуха.
Каменный уголь	8080 кал.	2720 Ц.	1450 Ц.
Кокс	6870 »	2390	1340
Дерево, высушенное при 120°.	3600 »	2500	1300
Дерево обыкн., с 20% воды .	2750 »	1900	1100

[1]) Если кузнец брызгает подчас воду в горн, то делает только для того, чтобы предохранить поверхность угольной кучи, покрывающей железо, от излишне быстрого сгорания и выделения теплоты, что дает экономию в угле и облегчает работы. *Л. П.*

Из таблицы видно, что искусственно высушенное дерево превосходит кокс по температуре сгорания, но значительно уступает ему в количестве теплоты.

Прсф. *Л. Пфаундлер.*
«Физика обыденной жизни», 1906.

Чтобы научно точно определить «теплотворную способность» какого-нибудь сорта угля (вообще топлива), мы тщательно перемешиваем некоторое количество исследуемого угля, превращаем его в порошок и берем пробу приблизительно в 1 грамм. Эту пробу кладем в небольшой тигель и присоединяем к нему, — как показано на рис. 7, — провода для электрического воспламенения угля. Тигель подвешивается в толстостенном сосуде, так называемой «бомбе», которая после плотного закрытия ее крышки наполняется кислородом. Бомба стоит в сосуде с водой (калориметре), в которую вставлен термометр; сосуд с водой в свою очередь окружен кожухом, который ограждает его от охлаждающего действия воздуха. Закончив все подготовительные операции, включают электрический ток, который накаляет проволоку, проходящую через уголь; последний зажигается и сгорает, соединяясь с кислородом. От этого бомба нагревается и отдает далее свою теплоту воде. По термометру определяют, насколько повысилась температура, а отсюда легко вычислить и теплотворную способность.

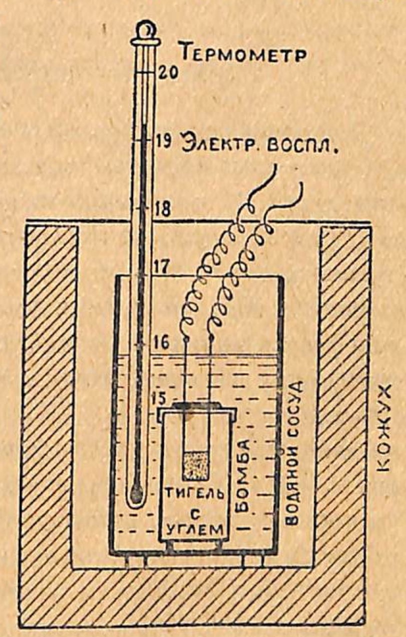


Рис. 7. Калориметрическая бомба.

Пусть проба угля весит 1 грамм, а заполняющая сосуд вода — 1,7 килограмма. Так как бомба и стенки сосуда тоже нагреваются, то надо предварительными испытаниями определить, сколько требуется

теплоты для нагревания их на 1°. Предположим, найдено, что для этого требуется столько же, сколько для нагревания 0,3 кг воды. Тогда мы можем строить расчеты так, как если бы вместо 1,7 кг воды нагревалось, при сгорании угля, 2 кг воды. Допустим, что повышение температуры, показанное термометром, составляет 3,5° Ц.

Теперь мы знаем следующее: 1 грамм угля при сгорании нагрел 2 кг воды на 3,5°, т.-е. уголь обладает теплотворной способностью в 7000 малых калорий (потому что $2000 \times 3,5 = 7000$).

Проф. *Г. Ганфштенгель.*

«Техническое мышление», 1919.

Вода — регулятор климата.

Удельная теплота атмосферного воздуха = 0,25, т.-е. составляет четвертую долю удельной теплоты воды. Следовательно, один фунт воды, теряя 1°, согревает фунт воздуха на 4°, или 4 фунта воздуха на 1°. Но один фунт воздуха наполняет около 770 раз большее пространство, чем один фунт воды; и, следовательно, 4 фунта воздуха наполняют 3080 раз большее пространство, чем фунт воды. Поэтому один фунт воды, остывая в воздухе на 1°, в состоянии повысить на 1° температуру объема воздуха в 3080 раз большего, чем его собственный.

Отсюда ясно огромное значение этого свойства воды, как регулятора климата. Становится понятным, почему климат островов гораздо умереннее и ровнее, нежели климат материков; окружающее море жадно поглощает солнечные лучи, но остается при этом сравнительно прохладным, умеряя таким образом температуру воздуха на островах. Зимою же накопленная за лето теплота выделяется водою весьма медленно. Каждый литр воды, отдавая воздуху свою теплоту, согревает 3080 литров воздуха на столько же градусов и, благодаря этому, предохраняет острова от зимнего холода. Это объясняет нам тот факт, что в Исландии зима менее сурова, чем в Милане. Мы можем этим объяснить также, почему в Англии лавры и другие нежные растения растут на открытом воздухе, тогда как в более южных странах они погибают от морозов, и почему лето Англии не позволяет созревать винограду, между тем как в упомянутых южных странах он растет в изобилии.

Итак, самые простые факты, которые мы изучаем в лабораториях, составляют ступени, по которым человек восходит до точного понимания величайших явлений природы.

Тиндаль.

«Физика в простых уроках».

Самое важное, с точки зрения физической географии, свойство воды — это ее громадная теплоемкость; все остальные тела, как жидкие, так и твердые, отличаются во много раз меньшею теплоемкостью. Например:

Тела	вода	лед	чугун	гранит	воздух
Теплоемкость .	1,000	0,505	0,13	0,20	0,237

Теплоемкость морской воды очень немного отличается от теплоемкости пресной, как это видно из следующего примера:

Соленость	0	2%	3%	3,5%	4%
Теплоемкость . .	1,000	0,951	0,939	0,932	0,926,

и потому физико-географическое значение теплоемкости воды может быть принято одинаковым для всех вод земного шара.

Действительно, воды покрывают около 71% земной поверхности, и на этом громадном протяжении они соприкасаются с другим океаном — воздушным, охватывающим 100% земной поверхности. Вследствие огромной разности в теплоемкости этих двух тел, мировой океан служит обширным источником запаса тепла для атмосферы.

При средней солености океана в 3,5%, — что при 0° соответствует удельному весу морской воды 1,028, и при удельном весе воздуха 0,0013, нетрудно вычислить, какое количество тепла отдает вода воздуху при своем охлаждении:

$$(1,028 \times 0,932) : (0,0013 \times 0,237) = \text{около } 3130.$$

Это значит, что если какая-нибудь единица объема морской воды, например, 1 куб. сантиметр, охладится на 1°, то он при этом выделит столько теплоты, что нагреет ею на один градус 3130 куб. см воздуха. Если бы, вместо воды, взять поверхность гранита (как это, например, имеется в Финляндии и Олонецкой губернии во многих местах), тогда в указанном расчете надо заменить удельный вес

воды, — 1,028, удельным весом гранита — 3, а вместо теплоемкости воды поставить теплоемкость гранита, т.-е. 0,2. Вычисление тогда даст результат 1960 куб. см вместо 3130 куб. см. Отсюда ясно видно, каким большим запасом тепла обладают воды земного шара, и какое громадное значение для климата всего земного шара, а следовательно, для всех физико-географических явлений (и зависящих от них экономических условий) имеет то обстоятельство, которое с первого взгляда не кажется столь важным, а именно, что 71% земной поверхности занят водой.

Ю. Шокальский.

«Океанография», *1917.*

III. Плавление и отвердевание.

Точка плавления и точка затвердевания.

Температура, при которой плавится лед, — строго определенная, и потому точка плавления льда есть такое же определенное свойство воды в твердом состоянии, как плотность, окраска и т. п. Каждое вещество характеризуется определенной точкой плавления, и так как даже на самых маленьких крупинках вещества можно легко заметить, как при нагревании оно начинает плавиться, то температура плавления часто применяется на практике, как средство характеристики и распознания веществ.

Но как же обстоит дело с обратным процессом затвердевания жидких веществ? Опыт отвечает на этот вопрос: так же, как и при плавлении твердых веществ. Если поместить смесь воды и льда не в теплой комнате, а на морозном зимнем воздухе, чтобы постепенно наступило замерзание воды, то мы найдем, что ртуть термометра займет опять совершенно то же положение, как и при плавлении, а следовательно, смесь имеет ту же самую температуру. Итак, в каком бы направлении ни совершалось превращение — от льда к воде, или от воды ко льду, — до тех пор, пока лед и вода находятся рядом друг с другом, температура остается постоянной.

Назвав температуру, при которой жидкость затвердевает, точкой затвердевания (замерзания), мы должны отметить, следовательно, что точки плавления и замерзания совпадают: в сущности, это даже не две различные точки, но обе обозначают ту температуру, при которой твердое и жидкое состояние вещества могут существовать одновременно, находясь рядом друг с другом. При этом безразлично, увеличивается ли количество одной или другой формы вещества, — это не имеет никакого влияния на температуру смеси.

Что же произойдет, однако, когда в конце концов весь лед растает? После того, как весь лед растаял, образовавшаяся вода может, конечно, нагреваться дальше, если сосуд стоит в теплом помещении. Если же, напротив, он помещается в холодной среде, то вся жидкая вода постепенно превращается в лед, который в свою очередь может быть охлажден до любой низкой температуры. *Однородные* вещества, воду или лед, можно довести до различных температур: лед насколько угодно градусов ниже 0°, воду выше 0°. Следовательно, нуль градусов есть та граница, на которой соприкасаются температурные области льда и воды.

То, что наблюдается для льда и воды, наблюдается также и для других веществ — с той только разницей, что их точка плавления, или температурные границы между твердым и жидким состояниями лежат при других степенях тепла.

Вильг. Оствальд.

«Введение в изучение химии».

Опыты Блэка над таянием льда.

В 1757 г. Блэк [1]) заметил, что когда лед или какое-нибудь другое тело переходит в жидкое состояние, то поглощается гораздо больше теплоты, чем обнаруживается помощью термометра. При этом тающие тела, поглощая значительное количество теплоты, не становятся, однако, заметно теплее. И обратно: когда жидкость отвердевает, из нее выделяется значительное количество теплоты, которая, однако, не могла быть обнаружена раньше помощью термометра.

Тогда Блэк приступил к определению того количества теплоты, которое поглощается при плавлении определенным количеством льда. В большом пустом пространстве, где температура оставалась достаточно постоянной, он повесил в некотором расстоянии одна от другой две колбы; в одной он поместил пять унций льда при 0° Ц., а в другой — воду при 0° Ц.; в воде помещен был точный термометр. Температура помещения была 8° Ц. Через полчаса температура воды поднялась до 4°; лед же весь растаял только спустя $10^1/_2$ часов. Итак, для того, чтобы растопить лед, потребовалось в 21 раз больше времени, чем для того, чтобы вода нагрелась на 4°, т.-е. $4 \times 21 = 84$ единицы. Пять унций воды тем же количеством теплоты нагрелись бы на 84°. Но по истечении $10^1/_2$ часов температура ледяной воды была только на 4° выше точки таяния, так что 80° «были поглощены тающим льдом и скрыты в воде, в которую этот лед превратился».

[1]) Джозеф Блэк — выдающийся шотландский ученый XVIII века, профессор химии, основатель учения об удельной теплоте и о скрытой теплоте плавления и парообразования. Умер в 1799 г. — *Сост.*

Затем форма опыта была изменена. Блэк взвесил кусок льда и опустил его в воду определенного веса и известной температуры. Теплая вода стала гораздо более холодной, чем в том случае, когда к ней прибавили равное количество воды при 0°. В этом опыте количество теплоты, необходимое для растопления льда, оказалось равным количеству, которое необходимо для нагревания такого же веса воды на 81°.

Потом был произведен третий опыт, из которого явствовало, что если поместить кусок льда в воду равного веса и температуры 81°, то он тает целиком, и вся смесь принимает температуру 0°. Ясно, следовательно, что для растопления льда потребовалась 81 единица — результат, совпадающий с предыдущим. Таким образом, скрытая теплота воды оказывалась равной 80. Точные современные измерения дают 79,5. Определение Блэка удивительно хорошо, если принять в расчет грубость измерительных средств, которыми он должен был тогда пользоваться.

Вильям Рамсей.

«Биографические и химические очерки», 1909.

Таяние льда.

Если обратим внимание на то, как лед и снег тают, когда они подвергаются действию теплого воздуха или когда после мороза наступает оттепель, то мы можем легко заметить, что как бы холодны они сначала ни были, они скоро доходят до их точки плавления, скоро начинают превращаться на поверхности своей в воду. Если бы было справедливо обычное мнение, что для полного их превращения в воду требуется лишь дальнейшее сообщение очень небольшого количества тепла, то через несколько минут или секунд вся масса, будь она даже значительных размеров, вполне расплавилась бы, потому что теплота непрерывно сообщается ей окружающим воздухом. Будь действительно так, последствия от этого во многих отношениях были бы ужасны: ибо если и при том, как обстоит дело в действительности,

таяние больших масс снега и льда вызывает бурные потоки и большие наводнения в холодных странах, — то что было бы, если бы снег и лед таяли так быстро, как необходимо следует из упомянутого мнения? [Медленность же таяния объясняется, согласно Блэку, тем, что на плавление расходуется теплота].

... Указанная теплота [т.-е. теплота плавления] идет исключительно на то, чтобы превратить лед в воду, при чем получившаяся вода не будет теплее, чем раньше был лед. Другими словами, тающему льду сообщается известное количество тепла, которое уходит на то, чтобы превратить его в жидкое состояние, не повышая его температуры. Теплота, таким образом, как бы поглощается водою или *скрывается* в ней, так что не оказывает на термометр никакого действия.

Джозеф Блэк (1757).

Теплота плавления воды.

Вода обладает необыкновенно большой теплотой плавления; не менее 80 калорий необходимо затратить, чтобы растопить лед: 80 грамм-калорий на 1 грамм льда. Иначе говоря: чтобы растопить 1 грамм льда, необходимо затратить столько же энергии, сколько ее нужно было бы для нагревания 80 г воды на 1°, или 1 г воды на 80°. В данном случае процесс плавления равноценен нагреванию на 80°. Выражаясь еще иначе: лед при 0° и вода при 0° по содержанию скрытой энергии столь же сильно отличны друг от друга, как вода при 0° и вода при 80°. Для сравнения укажем, что теплота плавления бензола [1]) — 30, свинца — 5,5, серы — 9,5, чистого железа — 6 калорий. Из металлов только один обладает весьма большой теплотой плавления — алюминий (102 калории), — свойство, получившее огромное техническое применение.

За следствиями, которые вытекают из большой теплоты плавления воды, недалеко ходить. Если уже при существующих условиях мы жалуемся, что употребляемый в хозяйстве лед слишком быстро тает, то насколько было бы неудобнее, если бы вода имела менее значительную теплоту плавления? В природе же тепловая инерция воды (так можно назвать рассматриваемое здесь свойство воды в связи с необыкновенно большой ее удельной теплоемкостью) кладет свой отпечаток на все явления, наблюдаемые в морях, реках, глетчерах и снежных полях.

[1]) Бензол при обыкновенной температуре — летучая жидкость. — *Сост.*

Теплота плавления не есть величина, которая при всяких обстоятельствах характеризуется одними и теми же числами. Она принимает различные значения в зависимости от того, происходит ли плавление при 0° или при другой температуре (что возможно при изменении давления или при иных обстоятельствах). Например, при 7° ниже нуля теплота плавления достигает только 76 калорий, и вообще с каждым градусом понижения она уменьшается почти на полкалории. Этот факт, рассматриваемый вне связи с другими, может показаться неожиданным: чем лед холоднее, тем сильнее, казалось бы, должен он противиться таянию; в действительности же наблюдается обратное. Эта странная особенность находится в связи с тем, что удельная теплоемкость льда меньше, чем воды; дальнейшее развитие этой связи завело бы нас слишком далеко. Упомянем лишь, что такою же особенностью обладают еще два-три тела (многие тела еще не исследованы с этой стороны) — и в числе их, например, фосфор.

Ф. Ауэрбах.

«Семь аномалий воды», 1912.

Равенство теплоты плавления и теплоты затвердевания.

Можно доказать непосредственным измерением, что при замерзании воды выделяется то же количество тепла, какое затрачивается при плавлении соответствующего количества льда. Далее, можно доказать справедливость того же закона для всех других веществ, известных в твердом и жидком состоянии, пользуясь для этого общим опытным законом, что тепло не может ни образоваться, ни исчезнуть, если одновременно не происходит никаких изменений в окружающей среде. Этот последний закон представляет частный случай общего закона о невозможности perpetuum mobile (перпетуум мобиле — вечное движение), или закона сохранения энергии, который является самым общим законом современного естествознания и будет нам встречаться в самых разнообразных формах.

Действительно: если бы теплота плавления данного количества воды была меньше, чем теплота затвердевания, то при плавлении мы

затрачивали бы меньше тепла, чем получали бы при замерзании, и благодаря этому получали бы некоторый избыток тепла. Если бы мы заставляли плавиться определенное количество льда и затем снова превращали бы полученную воду в лед, то, повторяя эти оба процесса любое число раз, мы могли бы накопить и произвольно увеличить этот избыток тепла без каких-либо изменений во внешней среде, т.-е. могли бы создать любое количество тепла из ничего. Согласно опыту, это невозможно.

Если бы, напротив, теплота плавления была больше, чем теплота замерзания, то, подобно предыдущему, произвольное количество тепла исчезало бы без каких бы то ни было изменений во внешнем мире, опять таки — явление, которое противоречит опыту. Итак, не остается ничего другого, как принять, что оба количества тепла равны между собой.

Вильг. Оствальд.

«Введение в изучение химии».

Существует только один вид теплоты.

Откуда бы теплота ни исходила — от руки, от нагретой воды, пара, до красна нагретого железа, пламени, солнца или иного источника теплоты — всегда ее можно измерить одинаковым путем, и количество теплоты, требуемое для произведения данного изменения — таяния фунта льда, обращения в пар фунта воды или же для нагревания воды от одной температуры до другой, — всегда одно и то же, из какого бы источника теплота ни выделялась.

Чтобы выяснить, не зависит ли действие теплоты от чего-либо, кроме количества получаемой теплоты, например, от температуры источника, мы произведем два опыта. Сначала употребим некоторое количество теплоты (например, теплоту, получающуюся при сгорании одного дюйма свечки) непосредственно на расплавление льда. Затем такое же количество теплоты сообщим куску железа, находящемуся при температуре замерзания воды; железо нагреется, и тогда мы поместим его в лед, так что некоторое количество льда растает, в то время как железо охладится до своей первоначальной температуры. Если бы количество растаявшего льда зависело от температуры источника теплоты, то в обоих случаях количества растаявшего льда должны были бы различаться, так как в первом случае теплота исходит непосредственно от сильно нагретого пламени, а во втором — то же самое количество теплоты исходит от сравнительно холодного железа.

Опыты показали, что никакой разницы в обоих случаях не существует, а потому теплота, рассматриваемая по отношению к ее способности нагревать тела и изменять их состояние, есть количество, подлежащее точному измерению, и не может представлять качественных отличий.

К. Максуэлл.

«Теория теплоты», 1883.

Расширение воды при замерзании.

Начиная с 4° Ц. до самой точки замерзания вода при охлаждении расширяется, а когда она превращается в лед, расширение ее совершается быстро и внезапно. Лед, как известно, плавает на воде, потому что, вследствие расширения, он становится легче ее.

Сила, с которою происходит это расширение воды при замерзании, огромна. Чтобы составить себе понятие об этой напряженности, сделаем опыт: вода наливается в железный сосуд, стенки которого имеют полдюйма толщины. Количество воды не велико, но она наполняет сосуд; после этого он плотно закрывается крышкой, навинчиваемой на его шейку. Берем и другой такой же сосуд. Погрузим оба сосуда в охлаждающую смесь. Они постепенно охладевают, вода внутри них доходит до своей точки наибольшей плотности, и без сомнения в этот момент не совершенно наполняет бутылки, а оставляет внутри небольшую пустоту. Но скоро сжатие воды прекращается, наступает расширение; пустота медленно заполняется; вода постепенно переходит из жидкого состояния в твердое, при чем объем ее увеличивается, и этому увеличению объема сопротивляются стенки железного сосуда. Но их сопротивление бессильно перед молекулярными силами: молекулы — это замаскированные гиганты. Раздается треск: бутылка разрывается кристаллизующимися частицами; то же происходит и с другою бутылкой.

В другом опыте с громким взрывом лопались толстые стенки артиллерийской бомбы: бомба была наполнена водою, туго завинчена и поставлена в кадку с охлаждающей смесью. При выполнении этого опыта надо покрывать кадку толстым холстом: когда я не делал этого, обломки бомбы подбрасывало под потолок.

Теперь вам понятно действие мороза на водопроводные трубы в домах. Обычно думают, что разрыв труб происходит во время таяния льда в трубах [1]), но на самом деле это происходит во время замерзания: трубы разрываются, и через их щели просачивается вода, образующаяся при таянии льда.

Остановимся немного на значении этого свойства воды в экономии природы. Румфорд, посвятивший этому предмету целую главу, между прочим, писал: «Мне кажется, что во всем видимом мире, подлежащем изучению человеческого разума, нет явления, которое могло бы поразительнее и осязательнее свидетельствовать о премудрости творца и той заботливости, с какой он устроил мир для сохранения животной жизни». Это воодушевление Румфорда вызвано соображением следующего рода. Представим себе озеро в холодный зимний день; верхний слой воды охлаждается, сжимается, становится плотнее и опускается, а место его занимает нижний слой, более теплый и более легкий, который потом охлаждается в свою очередь и спускается. Таким образом устанавливается круговорот: плотная, холодная вода идет ко дну, а более легкая, теплая поднимается наверх. Предположим теперь, что это продолжается и после того, как на поверхности воды образовалась тонкая ледяная кора, другими словами, предположим, что плотность воды с охлаждением ее неизменно возрастает. Тогда образовавшийся лед тотчас опускался бы на дно, и это продолжалось бы до тех пор, пока вся вода не замерзла бы. Все живые существа, обитающие в воде, при этом погибли бы. И вот, как бы во избежание этой опасности, природа уклоняется от обычного пути: она заставляет воду расширяться от холода, и холодная вода, подобно пене, плавает над более теплой водой. При дальнейшем охлаждении вода отвердевает, но это твердое тело опять таки легче лежащей под ним жидкости, — и лед является защитительной кровлей для живущих под ним существ.

Очевидно, Румфорд усматривал в этом свойстве воды единственное исключение из общего закона природы. «Не видим ли мы здесь

[1]) Вследствие дурной теплопроводности стен и почвы, холод весьма медленно проникает через них и достигает водопроводных труб в домах (особенно в подвалах) с значительным опозданием — нередко лишь тогда, когда вне здания успела уже после морозов наступить оттепель; в этом, по всей вероятности, и следует видеть причину распространенного заблуждения, будто водопроводные трубы лопаются не в мороз, а в оттепель, т.-е. не от замерзания воды, а от таяния льда. — *Сост.*

чудесного вмешательства божества с целью препятствовать распространению царства вечного льда на всей земле? В тех широтах, где теперь возвращение весны приветствуется криками восторга, где земля сама покрывается веселою одеждой и миллионы живых существ оглашают воздух песнями радости и ликования, — там раздавался бы только вой сурового ветра и видны были бы лишь снега, льды да облака, приносящие снежные бури».

Такие явления естественно поражают тех, которые знакомятся с ними. Но Румфорд заблуждался, предполагая, что это свойство воды доказывает чудесное посредничество божества. Предо мною железный сосуд, расколотый сверху донизу, — в нем заключается металл висмут. Я налил висмут в сосуд, когда этот металл был в расплавленном состоянии, и после того завинтил крышку сосуда. Металл охладился, затвердел и расширился с такою силою, что сосуд разорвался. Это свойство висмута не спасает от гибели ни одного живого существа, — а между тем оно вполне тождественно с тем свойством воды, о котором у нас шла речь. Скажу раз навсегда, что естествоиспытателю нет дела до каких бы то ни было намерений и целей природы. Исследуя природу, он должен доискиваться лишь **почему**, а не **для чего** происходит то или иное явление.

Дж. Тиндаль.

«Теплота, как род движения», 1880.

Образование льда.

Если температура остается некоторое время постоянно ниже нуля, *неподвижные* воды, т.-е. не имеющие течения, начинают замерзать на своей поверхности. На последней появляется легкая рябь, делающая ее матовой, и мало-по-малу образуется тонкая корочка, которая быстро начинает утолщаться и белеть, если продолжают стоять холода. Явление это объясняется условиями равновесия слоев воды, различных между собою по температуре и плотности.

Положим, что в ту минуту, как северный ветер принес с собою мороз, наша вода во всей ее массе имела температуру 10°. Охлаждение жидкости от соприкосновения с холодным воздухом происходит по направлению снаружи внутрь. Поверхность, имевшая 10°, скоро примет температуру только 9°; но при 9° вода бывает плотнее, тяже-

лее, чем при 10°; поэтому она упадет на самое дно и заменится не охладившимся еще слоем, температура которого равняется 10°. Этот последний, в свою очередь, подвергнется участи первого слоя, и так далее. Словом, в больший или меньший промежуток времени вся вода нашего пруда, на всей ее глубине, примет температуру 9°. Но вода при температуре 9° будет охлаждаться совершенно таким же образом, как охлаждалась она при 10°, т.-е. опять последовательными слоями. То же явление будет повторяться в таких же условиях при температуре воды в 8, 7, 6 и 5°; но когда дело дойдет до 4°, то все изменится.

В самом деле, при температуре 4° вода достигнет своей наибольшей плотности. Когда охлаждающее действие воздуха отнимает 1° тепла от верхнего слоя воды, когда этот последний будет иметь температуру только 3°, то такой слой окажется менее плотным, чем вся та масса воды, которую он покрывает собою; вследствие этого, он уже не погрузится более вниз. Новое уменьшение теплоты и подавно не заставит его погружаться, потому что при 2° вода еще легче, чем при 3°. Итак, оставаясь постоянно на наружной поверхности, непрестанно подвергающейся охлаждающему действию воздуха, упомянутый слой воды очень скоро потеряет все 4° тепла, которыми он еще обладал, и кончит тем, что достигнет нуля и, наконец, замерзнет. Отсюда следует, что под этой наружной ледяной пластинкой, как под крышкой, вся остальная вода останется в жидком состоянии, при чем температура ее, по крайней мере, на дне, будет на четыре градуса выше точки замерзания. И очевидно, что замерзание спокойно стоящей воды не могло бы происходить никаким другим способом.

Реки и вообще *текучие воды* замерзают не с поверхности, как стоячие воды, но образуют над собою ледяную кору путем соединения и спайки пловучих льдин, все более и более накопляющихся на реке во время больших холодов.

В небольших потоках воды, каковы ручьи и речки в несколько аршин шириною, лед начинает образовываться у каждого берега по всей его длине и, выступая вперед все более и более, доходит, наконец, до средины потока. В больших и сильных потоках лед, образовавшийся вдоль берегов, не может столь же легко нарастать, вследствие движения мимо него большой массы воды, и никогда не мог бы побороть это течение, дорасти до средины и покрыть собою реку во всю ее

ширину. Но в то же время большие пластины льда образуются *на дне* реки; эти льдины, в виде отдельных кусков разнообразной и неправильной формы, тотчас же отделяются от дна и всплывают на поверхность, благодаря своей меньшей плотности сравнительно с водою.

В речках, где вследствие течения постоянно возникают водовороты или водопады, вода не располагается последовательными слоями неодинаковой плотности. Здесь самая легкая вода не находится постоянно на поверхности: течения постоянно вгоняют ее в общую массу и смешивают с ней, постепенно ее охлаждая; таким образом, очень скоро оказывается, что вся вода в реке принимает одну и ту же температуру. В стоячей воде, как мы видели, охлаждение у дна не может быть ниже 4°; но если эту воду постоянно взбалтывать, то она и на поверхности, и в средине, и на самом дне может одновременно иметь одинаковую температуру, например, нулевую. По достижении такой одинаковости температуры, вода начинает замерзать со дна. Вот как объясняет это Араго:

Чтобы ускорить образование кристаллов в соляном растворе, достаточно ввести в него какой-нибудь остроконечный или угловатый, шероховатый предмет; около неровностей этого тела и начнут, главным образом, возникать кристаллы и быстро разрастаться. Всякий легко может убедиться, что то же самое справедливо и относительно образования кристаллов льда; если в сосуде, где происходит на ваших глазах замерзание воды, есть щель, бороздка или какое бы то ни было нарушение непрерывности поверхности, то эти именно неправильности и становятся центрами, около которых по преимуществу отлагаются иголочки отвердевшей воды. Все, что мы сейчас сказали, в точности происходит и при замерзании рек: образование льда происходит на самом их ложе, где имеются скалы, камни, древесные пни, трава и пр. Чем дольше стоят морозы, тем более увеличивается толщина образовавшегося льда и, наконец, становится столь толстой и прочной, что люди и тяжелые возы могут безопасно двигаться по нем; такая способность льда выдерживать большее или меньшее давление служит даже указателем и до некоторой степени мерою суровости зимы. Поэтому любопытно знать, какова должна быть толщина льда, чтобы он мог выдержать известные тяжести. Из опытов было найдено, что нужна толщина 5 сантиметров, чтобы лед мог держать одного человека, и 9 сантиметров, чтобы по нем безопасно мог проехать всад-

ник. Когда лед достигает 13 сантиметров, по нем уже можно перевозить пушки на санях; при толщине 20 сантиметров по нем можно везти полевые артиллерийские орудия в обыкновенной запряжке. Наконец, самые тяжелые из военных повозок, целая армия или многочисленная толпа людей может считать себя в полной безопасности на льду, если толщина его достигает 27 сантиметров.

В очень суровые зимы лед на реках России может достигать толщины около метра, но во Франции он никогда не бывает толще 70 сантиметров. Сопротивление льда таково, что в 1740 г. в Петербурге оказалось возможным построить из него красивый дворец длиною в 18 метров, шириною 6 метров и вышиною 6 метров. Основание этого ледяного дома превосходно выдерживало тяжесть стен и кровли. Перед ним стояло шесть ледяных пушек на лафетах из того же материала. Из них произвели по выстрелу ядрами; каждое из них пробило на расстоянии 60 шагов доску толщиною более 5 сантиметров. Стенки пушек были толщиною всего лишь 12 сантиметров; для заряда брали по 100 граммов пороха, и ни одна из пушек не треснула. Весь материал для постройки этого своеобразного здания был доставлен Невою.

В Монреале, в Канаде, часто строили, например, в 1885, 1887 г.г. во время карнавалов, подобные же парадные замки из ледяных глыб.

К. Фламмарион.

«Атмосфера».

Примечание. Сооруженный в Петербурге в 1740 г. ледяной дом (описанный в романе Лажечникова «Ледяной дом») стоял с января до исхода марта. Он имел 9 саж. в длину и 3 саж. ширины. Русский академик Крафт по этому поводу писал: «Ежели бы в солнечном теле жители обретались, то бы они текущим железом мыться и оное пить могли; жители, которых в планетах Венере и Меркурии в уме себе представить можем, могли бы равным образом свинец и олово употреблять. Вода наша, которую мы по большею частью видим как жидкое тело, в планете Сатурне всегда бы была камень, подобный твердостию мрамору, который бы, однако ж, сие свойство имел, чтобы от великого огня растаять мог. Ежели обретаются в оной планете жители, которым бы нужда велела домы себе строить, то бы они, конечно, сей водяной камень на то употребляли . . . . Но и здесь, в Санктпетербурге мы видели из чистого льда построенный дом, который по правилам новейшей архитектуры расположен и для изрядного своего вида и редкости достоин был, чтобы по крайней мере таково жь долго стоять, как и наши обыкновенные домы». («Описание ледяного дома», 1741 г.). — *Сост.*

Влияние давления на ход плавления.

Точка плавления тех тел, которые при плавлении сжимаются, действием давления понижается, и наоборот.

Это действие давления на точку плавления было сперва выведено теоретически и затем подтверждено опытом [1]). Причина, почему оно ранее ускользало от внимания наблюдателей, заключается, вероятно, в чрезвычайно малой величине его даже при больших давлениях.

Для льда теоретически выведено и в точности подтверждено опытом понижение точки плавления

в 0,0075 градуса Цельсия

на каждую прибавленную атмосферу давления. Можно выразить это в грубой форме, сказав, что под давлением одной тонны на квадратный дюйм лед плавится на один градус Цельсия ниже своей обыкновенной точки плавления [2]).

Многие последствия этого важного факта были общеизвестны прежде, чем указан был самый факт. В одной форме он, конечно, был хорошо известен сотни лет тому назад — именно в форме опыта, который мы производим, скатывая снежный шар. Школьники хорошо знают, что после очень морозной ночи снег не «катается»: производимое их руками давление недостаточно сильно для этого. Но если некоторое время подержать снег в руках, чтобы он согрелся приблизительно до точки плавления, то он опять получает способность «кататься» или, лучше, «быть скатываемым». Замечая колею, оставленную в снегу колесом, мы видим, что снег в ней раздавлен; обычно вслед

---

[1]) Открытие этого влияния сделано Джемсом Томсоном в 1849 г., и вычисленное им понижение точки плавления льда действием давления было в точности подтверждено в том же году опытами (его брата) Вильяма Томсона (он же — лорд Кельвин). Гопкинс, Бунзен и др. определили опытным путем повышение точки плавления, производимое давлением в веществах, которые при переходе в жидкое состояние расширяются. — *Тэт.*

[2]) Упражнение. Проверьте правильность этого расчета, принимая за «атмосферу» давление 1 килограмма на кв. сантиметр. — *Сост.*

за проездом нагруженной телеги, — а после проезда двух или трех даже наверное — снег оказывается сплоченным в чистый прозрачный лед. То же самое происходит постепенно, когда достаточно народа проходит по мостовой, покрытой снегом; и во всех этих случаях наблюдаемый результат обусловливается незначительным понижением точки замерзания.

Теперь мы можем понять, каким образом огромные ледниковые массы (глетчеры) медленно, подобно вязкому телу, подвигаются вперед в силу того своеобразного свойства льда, о котором идет речь: эти массы под большим давлением становятся как бы вязким телом. Давление внизу, в массе ледника, конечно, должно быть очень велико, и так как вся масса, — особенно летом — пропитана водой, то температура льда никогда не может упасть значительно ниже точки замерзания (кроме некоторых исключительных случаев, и то близ свободной поверхности). При поступательном движении массы, каждое мгновение в ней будут места, где давление окажется наибольшим, — где именно вязкое тело в таких же условиях уступило бы. Лед не обладает такою способностью уступать давлению, — но в нем есть нечто, обусловливающее совершенно сходный результат: там, где давление сосредоточивается, лед плавится, и так как вода занимает меньший объем, чем породивший ее лед, то мгновенно освобождается место, и давление переносится в другую часть массы. Вода таким образом освобождается от давления, уступая вследствие своего собственного сокращения при плавлении. Но по прекращении давления вода еще остается при температуре, которая ниже точки замерзания, и потому тотчас же снова превращается в лед. Все действие состоит в том, что лед на мгновение плавится в месте наибольшего давления и поддается совершенно подобно вязкому телу. Но как только он уступит и освободится сам собою от давления, так сейчас же образуется снова, и этот процесс совершается непрерывно по всей массе; таким образом лед, — хотя и вследствие исключительной свойственной ему особенности, — является как бы вязкою жидкостью, если он поставлен в такие внешние условия.

Первый, кто воспроизвел то же явление на опыте в малом виде, был, кажется, Долфус-Аусет, показавший, что, сжимая помощью гидравлического пресса несколько кусков льда, можно было их растопить, а прекращая давление, заставить отвердеть в сплошной кусок. Но с очень холодным льдом опыт ему не удавался: это значит, что даже

помощью гидравлического пресса он не мог произвести достаточно сильного давления [1]).

Если в конце цилиндра, в котором помощью гидравлического пресса сжат снег, открыть отверстие, то выдавливается постепенно наружу цилиндр или проволока плотного льду, — как это бывает и при выделке проволоки из мягкого металла. Механизм явления различен, но результат один и тот же.

Другой, простой, но поучительный опыт состоит в том, что вокруг поддерживаемого горизонтально ледяного бруска перебрасывают проволочную петлю и подвешивают к проволоке груз. Груз постепенно продавливает проволоку через лед, который тает под проволокой и тотчас же образуется вновь позади нее: проволока пройдет насквозь — словно сквозь сыр или мыло, оставив, однако, брусок таким же крепким, как прежде.

П. Дж. Тэт.

«Теплота», 1883.

Скользкость льда.

Один английский физик печатно сознался, что мы до того привыкли к скользкости льда, что если бы его — до того как он сам задумался над этим вопросом — спросили невзначай, отчего лед скользкий, он ответил бы: «оттого что он скользкий», и только подумавши, пришел бы к правильному объяснению.

В местах, в которых нога нажимает на лед или снег, они под влиянием давления, вызываемого весом тела, плавятся, — и между ногой и почвой получается слой жидкой смазки, которая значительно уменьшает силу трения и делает снег и лед скользкими, как скользка панель, покрытая слоем жидкой грязи. Когда нога сходит с места, смазка эта снова замерзает, образуя на снегу ледяной след.

Что тут не в степени гладкости дело, видно из того, что самый шероховатый и бугристый лед является едва ли не более скользким,

---

[1]) Указанным свойством тающего льда пользуются и дети, когда они делают снежные комы и бабы. Известно, что это удается лишь тогда, когда снег начинает уже таять, или, по крайней мере, когда он лишь настолько холоднее 0°, что от теплоты руки может нагреться до этой температуры. Очень холодный снег представляет сухой, не слипающийся порошок. — *Г. Гельмгольц.*

чем зеркально гладкий, — потому что у последнего площадь соприкосновения с ногою больше, а следовательно, давление ноги на лед меньше.

Вообще, чем на меньшей поверхности сосредоточено давление тела на лед и чем менее низка температура льда, тем более скользким должен он быть. Поэтому на коньках можно скатиться дальше с горы, чем без коньков, и кататься на коньках тем легче, чем температура ближе к 0°. Когда температура воздуха выше 0°, лед становится рыхлым, по крайней мере в верхних слоях, и коньки слишком врезаются в лед. В большие же морозы коньки как-то прилипают ко льду: жидкой смазки образуется очень мало, и она замерзает раньше, чем нога успеет сойти с места.

Так как из материалов, встречающихся в природе, лед является единственным, у которого температура плавления лежит в пределах температуры воздуха и понижается при повышении давления, *то лед — единственное скользкое тело в природе.*

Проф. *Б. П. Вейнберг.*

«Снег, иней, град, лед и ледники», 1919.

IV. Парообразование.

Кипение воды.

При нагревании воды из нее прежде всего уходит заключающийся в ней воздух. Он поднимается в виде маленьких воздушных пузырьков сквозь воду вверх. Спустя некоторое время на дне сосуда образуется пар. Но первые пузырьки пара не достигают поверхности воды, а сжижаются по пути, так как вся масса воды еще недостаточно нагрета. Вследствие этого вода и сосуд начинают дрожать, что воспринимается нами, как звучащий тон: вода «поет». Это происходит непосредственно перед кипением (ср. «пение» самовара незадолго до закипания, а также в начале остывания). Когда «пение» прекращается, то вода настолько горяча, что пар в пузырьках уже не конденсируется по пути, а поднимается на поверхность воды [1]).

Во все время кипения температура воды не поднимается, хотя огонь отдает воде тепло непрерывно. Это пытались объяснить тем, что пар образуется только на дне сосуда, а остальная вода достигает температуры, необходимой для парообразования, лишь приходя

---

[1]) «Поднятие пузырьков лучше перемешивает воду, чем одно расширение; поэтому вся вода скоро нагревается повсюду и начинает кипеть. Тогда пузыри быстро увеличиваются во время своего полного восхождения, лопаются в воздухе, разбрасывают воду и производят хорошо известное клокотание. Пар, при выходе из пузырей, есть невидимый газ. Но, входя в более холодный воздух, он охлаждается ниже своей точки сгущения, и часть его образует облако, состоящее из маленьких капель воды, плавающих в воздухе. В то время как это облако рассеивается и смешивается с сухим воздухом, количество воды в каждом кубическом футе объема уменьшается, а объем каждой части облака возрастает. Маленькие капли воды начинают испаряться, как только окажется достаточно пространства для их пара, образующегося при существующей температуре атмосферы; таким образом облако переходит снова в невидимый газ» *(Максуэлл «Теория теплоты»).*

в соприкосновение с дном; думали, что если бы вся масса воды была нагрета до точки кипения одновременно, то малейшего притока теплоты было бы достаточно, чтобы мгновенно превратить всю массу воды в пар.

Блэк первый указал на неправильность этого объяснения. «Легко показать, — писал он, — что парообразование требует большого количества тепла даже в том случае, когда вода уже доведена до температуры, малейшее повышение которой превращает воду в пар. Если бы это было не так, вся масса воды взорвалась бы, т.-е. мгновенно превратилась бы в пар и притом с силою, напоминающей взрыв пороха. Этого не происходит лишь потому, что пар при своем образовании поглощает большое количество теплоты, при чем он не нагревается настолько, чтобы это могло быть замечено по показанию термометра.

«Когда котел с водою ставят на огонь, то с первого момента и до начала кипения теплота быстро переходит через котел в воду. Допустим, что вода нагревается в течение каждых пяти минут на 20°. Но было замечено, что переход теплоты от одного тела к другому, при прочих равных условиях, протекает соответственно разности их температур (т.-е. при одинаковой разности температур переходит одинаковое количество теплоты, а при неодинаковой разности — количество, пропорционально большее или меньшее). Так как во время кипения температура воды не повышается заметным образом по сравнению с температурой пламени, то теплота и во время кипения должна переходить в воду приблизительно в таком же количестве, как до наступления кипения. И если бы обычный взгляд на кипение был правилен, то вся масса воды должна была бы превращаться в пар в течение нескольких минут: получилось бы огромное расширение, достаточно сильное для того, чтобы взорвать на воздух дом».

Опыты показали Блэку, что требуется приблизительно вшестеро более времени, чтобы данное количество кипящей воды превратить в пар, чем сколько нужно, чтобы это количество нагреть от 10° до температуры кипения. Поэтому, если допустить, что в продолжение выкипания сосуд получал от пламени столько же теплоты, сколько входило в него, когда он нагревался от 10° до 100°, — то окажется, что для превращения в пар путем кипения единицы веса воды требуется вшестеро более единиц теплоты, чем сколько затрачивается на нагревание ее на 90°, т.-е. $90 \times 60 = 540$ единиц (число, близкое к найденному позднее более точными исследованиями).

Из этих опытов Блэк, руководясь аналогией с процессом таяния льда, заключил, что жидкость, превращаясь в пар, поглощает значительное количество тепла, которое он назвал *скрытой теплотой пара*, желая выразить, что теплота эта скрыто присутствует в паре; вследствие этого пар, охлаждаясь и сгущаясь в жидкость, доставляет теплоты в несколько раз более, чем сколько доставляет такое же по весу количество жидкости при одинаковой температуре. Он писал:

«Когда я вдумывался в эту мысль (о скрытой теплоте пара), со всех сторон приходило ко мне убеждение, что количество тепла, заключающееся в паре, должно быть гораздо больше того, какое обнаруживается через его явную теплоту или температуру. Каждый знает обжигающую силу пара. Мгновенная струя его из носика чайного котелка, едва увлажняющая руку и содержащая воды не больше четверти капли, тотчас всю руку покрывает пузырями ожога, — чего не могли бы произвести тысячи капель кипящей воды. Кого не удивляло огромное количество тепла, замечаемого в холодильнике при обыкновенной перегонке? При перегонке спирта снабжение холодильника постоянным притоком холодной воды часто стоит винокурам не меньше труда и издержек, чем снабжение их печей топливом. Устройство таких заводов в больших городах, где в других отношениях было бы наиболее удобства, встречает препятствие именно в затруднении иметь достаточное количество холодной воды. Чем более я думал об этих предметах, тем удивительнее мне казалось, как такая общеизвестная вещь не привлекала на себя внимания и осталась незамеченною».

Теплота парообразования воды.

Если теплота плавления воды необычайно велика, то в еще большей степени обращает на себя внимание родственная ей величина, относящаяся уже к другому роду явлений, — именно, к переходу тел из жидкого состояния в газообразное. Как для превращения льда в воду, так и для превращения воды в пар необходимо затратить некоторое количество энергии, которую измеряют калориями и называют т е п л о т о й п а р о о б р а з о в а н и я (или с к р ы т о й теплотой парообразования).

Эта величина у воды еще значительнее теплоты плавления. Не меньше 536 калорий необходимо сообщить единице массы воды, чтобы

превратить ее в пар! Мы не вполне можем понять причину этого явления [1]). Практическим последствием этого является чрезвычайная неэкономичность получения высоких температур при помощи воды, которую — будь на то возможность — следовало бы заменить другой жидкостью. Итак, к большой теплоте плавления и большой удельной теплоемкости надо присоединить еще огромную теплоту парообразования. Необходима гигантская затрата тепла, чтобы превратить 100-градусную воду в 100-градусный пар. Припомним для сравнения, что равное количество спирта превращается в пар одною третью, а ртути — $^1/_8$ той энергии, которая нужна для воды. Сопоставляя три упомянутые особенности воды, мы получаем представление о той огромной внутренней энергии, которая скрыта в водяном паре.

Ф. Ауэрбах.

«Семь аномалий воды», 1912.

Нагревание водяным паром.

Если требуется нагреть значительную массу жидкости в различных сосудах, то было бы весьма дорого устраивать все сосуды металлические и под всяким топку для нагревания. А такой случай на заводах встречается на каждом шагу. В этих случаях употребляют один паровик, и из него проводят водяной пар в жидкость или вообще в сосуд, который требуется нагреть. Водяной пар, охлаждаясь и превращаясь в жидкость, выделяет скрытую в нем теплоту, и так как она велика, то малым количеством пара можно произвести значительное нагревание. Требуется, например, нагреть 1000 килограммов воды от 20° до 50°, на что необходимо приблизительно израсходовать 30000 единиц тепла. Из паровика станем выпускать пар, нагретый, например, до 100°, в воду. В каждом килограмме воды при 50° заключается около 50 единиц тепла, а в каждом килограмме водяного пара при 100° заключается 640 единиц тепла: следовательно, каждый

[1]) Менделеев говорит по этому поводу следующее: «Это находит объяснение в том, что вода из всех жидкостей представляет наименьший химический частичный вес, а тепло, испаряющее количества, пропорциональные частичным весам, для всех веществ хотя не одинаково в точности, но близко, так как произведение из скрытой теплоты испарения на частичный вес есть величина, мало изменяющаяся для хорошо изученных веществ» («Вода», Нов. Энц. Словарь). — *Сост.*

килограмм водяного пара, охладившись до 50°, передает 590 единиц тепла; следовательно, 51 килограмм водяного пара в состоянии будут произвести требуемое нагревание 1000 килограммов воды от 20° до 50°.

В химической практике весьма часто применяют воду для нагревания. Для этого обыкновенно употребляют металлические сосуды, чашки или котелки [с водою], закрывающиеся кольцами, концентрически вкладывающимися друг в друга, и называемые водяными ваннами. На эти кольца ставятся нагреваемые предметы, например, стаканы и чашки с жидкостями, колбы, реторты и т. д., а ванна с водою нагревается. Выделяющийся пар нагревает дно сосуда и тем производит желаемое повышение температуры.

Д. И. Менделеев.

«Основы химии».

Упражнение. Проверить приведенный здесь расчет количества пара, необходимого для нагревания воды, составив и решив соответствующее уравнение.— *Сост.*

Тушение пожаров.

Что нужно делать при тушении пожара? Мы должны тогда поставить себе две цели: удаление кислорода (воздуха) и охлаждение. Средство, к которому всего чаще прибегают в таких случаях, — вода, служит обыкновенно обеим целям. Покрыв горящее вещество слоем воды, его отделяют от кислорода воздуха и одновременно понижают его температуру [1]) ниже температуры горения [2]). Когда приходится тушить горящую жидкость, более легкую, нежели вода (масло, керосин, жир, эфир и т. д.), вода часто не помогает и даже может оказаться вредной. Если масло, растопленный жир или смола нагреваются выше температуры кипения воды, то прилитая вода нагревается в этой массе,

[1]) *Упражнение.* Укажите причину понижения температуры. — *Сост.*

[2]) Однако, в случае больших пожаров впрыскивание воды внутрь открытого огненного моря может быть не только бесполезно, но даже и вредно; если воды оказывается недостаточно для тушения огня, то большие количества образующегося пара могут усилить тягу воздуха (укажите причину) и тем усилить пламя. Поэтому лучше направлять струю на края огненного моря, чтобы, по крайней мере, воспрепятствовать росту охваченного пламенем пространства. *Л. П.*

превращается в пары, разносящие горящую жидкость все дальше и дальше, так что пожар разрастается. В таких случаях приходится прекращать доступ воздуха другими средствами: песком, землей и т. д. Если пожар начинается в каком-нибудь закрытом помещении (погребе, складе), то вернейшее средство потушить его — плотно закрыть помещение и таким образом прекратить доступ воздуха. Целесообразно также в таком случае образование газов, не поддерживающих горения, как, например, углекислоты (обливанием содовой водой) или сернистой кислоты (зажиганием серы).

Рассмотрим еще вопрос, что нужно делать людям, на которых загорелось платье. Придя в полное замешательство, они, к сожалению, теряют способность размышлять и, чтобы спастись, бросаются бежать к воде, которая часто находится на довольно далеком от них расстоянии. Этим они образуют сильный ток воздуха и только усиливают пожар, так что помощь приходит в большинстве случаев слишком поздно. Конечно, если спасительная вода находится поблизости, то стоит к ней побежать, но если этого нет, то гораздо лучше броситься тотчас на землю, кататься по ней или же потушить огонь, покрывшись чем-нибудь. Когда человек бросается на землю, пламя тотчас же потухает на частях тела, обращенных к земле; на противоположной стороне тела пламя имеет направление от тела, между тем как на человеке, когда он стоит, пламя распространяется вдоль тела. Если даже не удается тотчас же потушить на себе пламя, то, по крайней мере, замедляется губительное действие его, и помощь может поспеть еще во-время. Часто несчастье происходит от того, что человек нечаянно обливает себя жидкостью, которая тотчас же загорается (керосином, бензином, спиртом). В таком случае необходимо прежде всего сбросить с себя или сорвать горящее платье, затем обернуть себя какими-нибудь тканями, платьем и броситься в них на землю. Шелк, шерсть, перины загораются не легко, а когда загораются, то пламя не распространяется в них быстро, так что с их помощью может удаться потушить пожар. Все эти соображения небесполезно запомнить, чтобы в случае нужды возможно скорее и увереннее принять наиболее целесообразные меры для спасения себя или другого.

Проф. *Л. Пфаундлер.*

«Физика обыденной жизни».

Водяной пар в воздухе.

Так как окружающий нас воздух везде приходит в соприкосновение с поверхностью воды, именно с реками, озерами и, наконец, с океанами, которые занимают $^5/_7$ всей поверхности земли, то нужно было бы думать, что водяной пар присутствует в воздухе в таком количестве, которое отвечает давлению водяного пара, согласно господствующей температуре. Если это действительно имеет место, то говорят, что воздух *насыщен* водяным паром; это выражение означает, что при данных условиях вода не может более переходить в воздух. Если бы, благодаря тем или иным условиям, в воздухе было больше водяного пара, то избыток тотчас же должен был бы выделиться в форме жидкой воды.

В действительности воздух только очень редко (например, при сильном дожде) бывает насыщен водяным паром, но обыкновенно в воздухе находится только около $^2/_3$ той воды, которая могла бы содержаться при его насыщении. Это зависит от того, что при обыкновенных условиях действует много причин, уменьшающих количество воды в воздухе, и отсутствуют причины, могущие вызвать пересыщение воздуха водяным паром. Главную роль играют здесь изменения температуры воздуха.

Мы знаем, что давление пара воды, как и всякой другой жидкости, увеличивается с повышением температуры. Поэтому и количество воды, которое может содержаться в определенном объеме воздуха при его насыщении, также возрастает с температурой. В кубическом метре воздуха при различных температурах и при условиях насыщения содержатся следующие количества воды:

Температура.	Число *г* воды в $м^3$.
0°	4,9
5°	6,8
10°	9,4
15°	12,7
20°	17,1
25°	22,8

Как видно из таблицы, количество насыщающей воды приблизительно удваивается, когда температура возрастает на 10°; поэтому, если некоторое количество воздуха, насыщенное при 5°, будет нагрето

до 15°, то оно может воспринять еще такое же количество воды, какое оно заключало до нагревания. Иными словами, при этой температуре оно насыщено не вполне, но только наполовину.

Таким образом, если воздух, насыщенный водяным паром над поверхностью моря, двигается над сушей и нагревается, то благодаря этому он становится уже ненасыщенным. Если же он охлаждается, то избыток воды выделяется в виде дождя или росы, и если после этого он нагреется снова, то он опять-таки становится ненасыщенным. Это и является причиной того, что воздух как в открытом пространстве, так и в комнате почти никогда не бывает насыщен, — особенно зимою, когда холодный наружный воздух даже и в состоянии насыщения содержит очень мало водяного пара. Нагреваясь в комнате, он становится в сильной степени ненасыщенным или сухим; поэтому комнатный воздух зимою бывает обыкновенно очень сух.

Неполное насыщение воздуха водяным паром служит причиной того, что мокрые или влажные предметы высыхают на воздухе. В насыщенном влагой воздухе этого не происходит.

Легко убедиться, что обыкновенный сухой комнатный воздух содержит водяной пар — для этого достаточно его охладить. Если бросить в стакан с водой кусок льда и перемешать, то вода вместе со стенками стакана охладится, и когда температура достаточно понизится, то влага из воздуха оседает на стенках стакана, что легко заметить по его матовому виду; тогда говорят, что стакан запотел. Это происходит тем скорее, чем ближе окружающий воздух к степени насыщения паром. Так как люди постоянно выдыхают водяной пар, то воздух в помещении, где собрано много людей, содержит обыкновенно много пара и потому он ближе к насыщению. Поэтому в большом обществе, особенно под конец собрания, стаканы обыкновенно запотевают при вливании в них холодного напитка. По той же причине отпотевают и окна, т.-е. покрываются капельками жидкой воды, когда на дворе стоит холодная погода; это происходит тем легче, чем влажнее и теплее воздух в комнате.

Наблюдая температуру, при которой наступает выделение жидкой воды, можно определить степень насыщения влажного воздуха. Замечание, сделанное выше о том, что количество воды, заключающееся в насыщенном воздухе, удваивается при повышении температуры на 10°, позволяет сделать заключение, что если необходимо понижение температуры на 10°, чтобы в описываемом опыте образовалась роса

на стакане, то, следовательно, окружающий воздух был насыщен водяным паром только наполовину. Если t — температура данной среды, t_1 — температура, при которой стакан покрывается росой, далее, если d и d_1 обозначают количества воды, насыщающие воздух при температурах t и t_1 (величины d и d_1 находят в особой таблице), то $d : d_1$ показывает степень насыщения данного воздуха водяным паром, или, короче, — *влажность* воздуха. Таким образом по «точке росы» можно определить влажность.

Вильг. Оствальд.

«Введение в изучение химии», 1910.

Роса.

Если воздух подвергается охлаждению, он становится непрозрачным, вследствие перехода паров в жидкое состояние, и тогда получается то, что мы называем *туманом*. Если эту степень холода имеет твердое тело, пар сгущается на его поверхности, и является *роса*. Роса не спускается с неба, как говорится еще до сих пор в некоторых книгах. Происхождение ее не имеет ничего общего с происхождением дождя. Она *образуется* в том самом месте, где ее наблюдают. Если поместить на открытом воздухе в тихую ясную ночь маленькие количества травы, ваты, пуха или другого волокнистого вещества, мы найдем через некоторое время, что температура их может понижаться на 6°, на 7° и даже на 8° ниже температуры окружающего воздуха. В тех местах, куда не проникает солнечный свет и откуда открывается большое пространство неба, это различие между температурой предметов и температурой атмосферы становится ощутительным уже около 4 часов пополудни; утром оно продолжается несколько часов после восхода солнца. Наблюдения физика Уэльса, продолженные Араго, показали, что в тихую ночь трава луга может быть от 6° до 7° холоднее воздуха. Термометр, приведенный в соприкосновение с клочком шерсти, положенным на доску, возвышающуюся на 1 метр над почвой, показывал в тихую ясную погоду на 5° менее другого термометра, шарик которого соприкасался с подобным же клочком шерсти, но находившимся на нижней стороне той же доски. Термометр, помещенный прямо на столе, под открытым небом в ночное время, не показывает температуры воздуха: он всегда стоит ниже, когда небо чисто и когда нет ветра.

Это охлаждение происходит от ночного лучеиспускания, когда никакое препятствие не мешает рассеянию теплоты тела излучением. Прозрачный воздух не может служить препятствием для этой потери теплоты, но таким препятствием может служить облако, деревянный, холстинный или бумажный экран или просто дым. Без препятствий тело охлаждается сообразно своей способности к лучеиспусканию, которая различается, впрочем, сообразно телам (так, например, она весьма сильна для стекла и весьма слаба для металлов). Когда температура тела, выставленного таким образом на воздухе, опускается до градуса насыщения, атмосферная влага отлагается на нем, принимая сперва форму сферических капелек, потому что такова форма, какую принимает всякая совокупность частиц, предоставленная внутренним силам сцепления. Затем, когда эти капли становятся достаточно тяжелыми и достаточно близкими друг к другу, они расстилаются, как тонкий слой воды, на поверхности тела.

Роса бывает обильной только в тихие и ясные ночи. Некоторые следы ее можно видеть и в облачные ночи, если не было ветра или если, несмотря на ветер, погода оставалась ясной; но роса никогда не образуется при соединенном действии ветра и покрытого неба. Обстоятельства, благоприятные для обильного осаждения росы, соединяются скорее весною и осенью, чем летом. Различия между температурами дня и температурами ночи никогда не бывают так велики, как весною и осенью.

Эти явления осаждения росы на плотном и гладком предмете, как, например, на стеклянной пластинке, вполне походят на те явления, какие замечаются, когда оконное стекло подвергается действию струи водяного пара, более нагретой, чем оно само. Легкий и однообразный слой влаги сперва заставляет тускнеть поверхность; затем образуются неправильные и сплюснутые капельки, которые соединяются друг с другом, приобретя известный объем, и стекают затем ручейками по всем направлениям. Часто при внесении в театральную залу стекла бинокля, охладившиеся от температуры наружного воздуха, тускнеют от такого же осаждения влаги, которое представляет собою настоящую росу. В зимние холода, если открыть окно в столовой, где только что окончили продолжительный обед, образуется облако при вхождении холодного воздуха, и потолок смачивается длинным пятном сгущенного пара. В России иногда образуется в мороз облако, как только откроют окно.

Роса в тропических странах оказывает заметные и благоприятные для растительности действия. Когда воздух, насыщенный парами при температуре теплого солнечного дня, охлаждается при заходе солнца, роса отлагается обильно в течение ночи; она струится с листьев, и утром можно видеть иногда траву, столь же мокрую от росы, какою она могла бы быть от дождя. Она часто заменяет дождь, орошая растения, которые без нее погибли бы от сухости.

Мы в большей или меньшей мере можем отметить обилие росы, но количество ее трудно измерить, так как она не падает сверху, подобно дождю. Ее появление зависит от лучеиспускательной способности тела, которое она смачивает; она отлагается лишь на веществах более холодных, чем окружающий воздух, и в количествах тем больших, чем резче эта разница температур. Пахотная земля, лес, утесы, песок обнаруживают весьма изменчивые количества росы.

К. Фламмарион.

«Атмосфера».

V. Теплота и работа.

Краткая история паровой машины.

В течение многих истекших уже веков человек пользовался только теми силами, которые природа предоставляла ему совершенно открыто, например, силой текущей воды и силой ветра — для движения мельниц и для путешествий на кораблях, силой упругости — для развития большей скорости (метательных снарядов) и т. д.

Только в новейшее время люди стали производить такие силы и искусственно. Между этими силами первое место, конечно, принадлежит силе пара, развиваемой при помощи тепла и преобразуемой далее в любую механическую работу.

Стоит обратить внимание на то обстоятельство, как много требовалось времени и труда, чтобы какую-нибудь идею, совершенно верную в теории, воплотить в соответственную машину, а последнюю различными усовершенствованиями довести до той степени практичности, при которой она давала бы действительно полезные результаты.

Первое стремление в этом отношении, за небольшими разве исключениями, было направлено на постройку таких машин, помощью которых можно было бы выкачивать воду из глубины рудников.

Уже в начале семнадцатого столетия зародилась мысль о том, нельзя ли с этой целью применить пар, образующийся при нагревании воды, и им поднимать из рудников воду до поверхности земли. Вопрос этот в течение всего семнадцатого столетия горячо обсуждался, и в результате действительно явились некоторые механические приспособления для отлива воды; но все они были настолько непрактичны, что не могли дать никаких положительных результатов. Наконец, в исходе семнадцатого столетия ландграф Гессенский Карл поручил французу *Папину* заняться снова разработкой того же самого вопроса, т.-е. попытаться построить более целесообразную машину.

Папин был в то время профессором в Марбурге, куда бежал из Франции после отмены Нантского эдикта. Своим опытам он дал совершенно новое направление, и, наконец, после долгих усилий ему удалось построить модель новой паровой цилиндрической машины. Модель состояла из цилиндрического сосуда, в нижнюю часть которого наливалось немного воды, а на воду помещали поршень. При нагревании воды образовывался пар, который давил на поршень и заставлял его подниматься; при охлаждении же цилиндра наружный воздух в свою очередь давил на поршень сверху вниз, заставляя его опускаться. Для каждого поднятия и опускания поршня требовалось, однако, около одной минуты; время это было бы гораздо значительнее для настоящей машины, поставленной в руднике. В последнем обстоятельстве и состояла практическая неприменимость Папиновой машины.

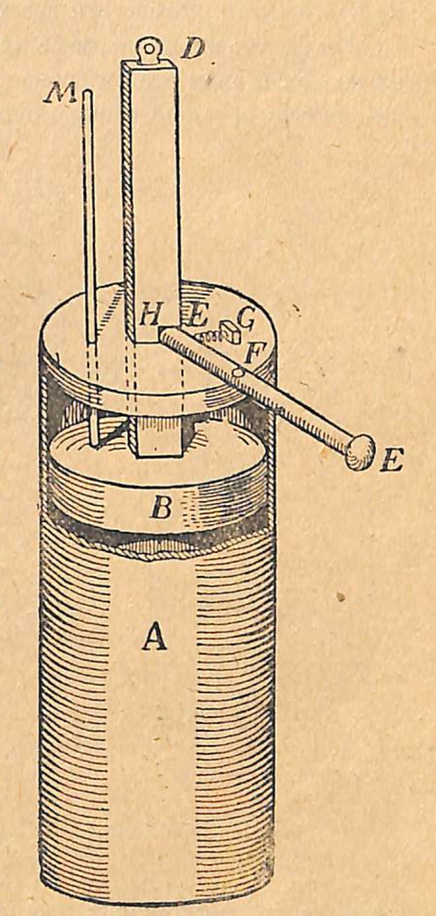


Рис. 8. Первая паровая машина Дени Папина. Рисунок взят из его сочинения, 1690 г.

Десять лет позже два англичанина, *Ньюкомен* и *Каули*, снова принялись за то же дело, и им удалось усовершенствовать машину Папина тем, что пар, поднимающий поршень, развивался не в самом цилиндре, через нагревание последнего, а проводился сюда по трубе из отдельно стоящего парового котла. Этим устройством устранялась трата времени на нагревание цилиндра, а следовательно и движение поршня могло происходить гораздо быстрее.

Таким образом, только в 1712 г. явились первые машины для приведения в действие водоотливных насосов, и машины эти стали упо-

требляться почти на всех тогдашних рудниках. Можно было ожидать, что после подобной удачи явятся в самом непродолжительном времени и дальнейшие усовершенствования машин. Но вышло иначе: в течение почти целых пятидесяти лет машины остались без всякого изменения, и все строились по раз заведенному образцу, с маленьким разве только изменением относительно управления хода поршня. Следует еще прибавить, что подобные машины могли с выгодою работать лишь

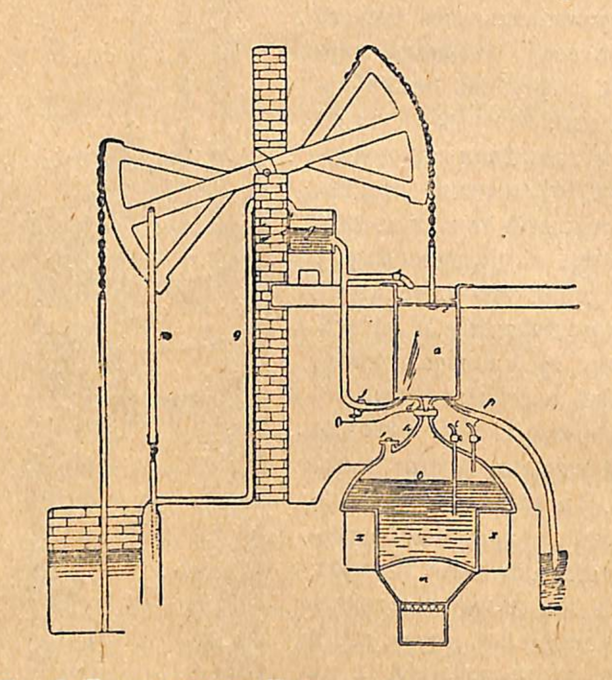


Рис. 9. Паровая машина Ньюкомена (старинное изображение).

в каменноугольных копях, где топливо было даровое; при других же условиях они не могли работать, так как расходовали слишком много горючего материала.

Только в 1764 г. в этом отношении сделан был громадный шаг вперед. Молодому и неизвестному тогда еще механику Джемсу *Уатту*, работавшему для физического кабинета при Глазговском университете, дана была для починки модель Ньюкоменовской паровой машины. Рассмотрев машину, Уатт придумал такое важное и в то же время столь простое усовершенствование, что совершенно непонятно, как

в течение полустолетия идея эта не могла прийти в голову строителям упомянутых паровых машин. Как я уже сказал, парообразование при Ньюкоменовской машине происходило не в самом цилиндре,

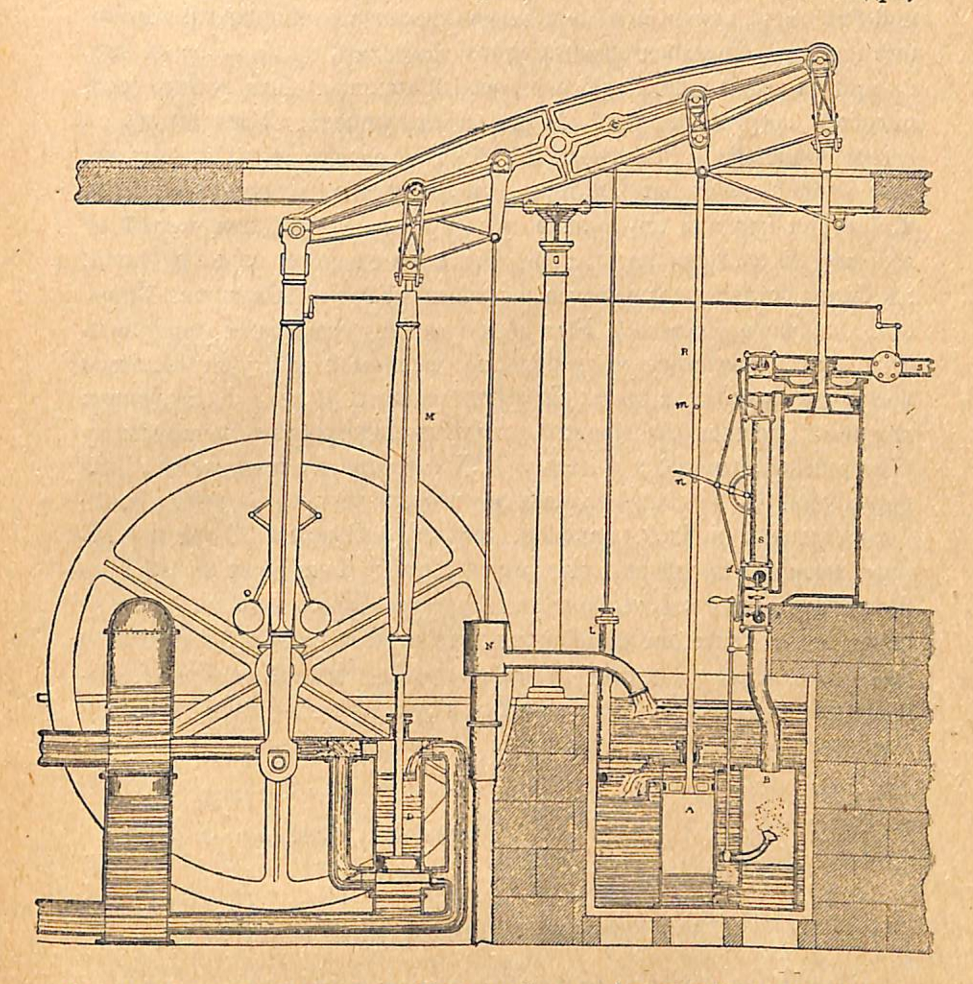


Рис. 10. Водоподъемная машина Уатта двойного действия в том виде, в каком эти машины строились заводом Болтона и Уатта (старинное изображение).

а в отдельном паровом котле, откуда пар по особой трубе проводился уже в цилиндр; о х л а ж д е н и е же пара в цилиндре происходило через впрыскивание холодной воды. Уатт нашел, что и о х л а ж д е н и е пара можно производить вне цилиндра, для чего стоит

только последний привести на короткое время в сообщение при помощи трубки с холодным и безвоздушным пространством. Таким образом Уатт явился изобретателем холодильника. Итак, в машине, построенной Уаттом, не нужно было каждый раз охлаждать цилиндр для опускания поршня, а следовательно и снова нагревать его, а это, понятно, влекло за собой громадную экономию в топливе. Как велико было подобное сбережение угля, видно из следующего. Уатт вместе со своим компаньоном *Болтоном* взял патент на свое усовершенствование, выговорив от владельцев, которые ставили у себя в рудниках машины, чтобы они платили ему только третью часть суммы, получаемой от сбережения расходов на топливо. При этом с одного только рудника, где были поставлены три насоса, он получил в год 48 000 марок. Кроме этого главного изменения, Уатт ввел в машину еще другие усовершенствования, вследствие чего паровые машины стали употребляться не только в рудниках, но и при других работах. В течение следующих тридцати лет вновь изобретенные машины подвергались дальнейшему усовершенствованию, а в начале XIX столетия их применили и для пароходов. Спустя еще двадцать лет и после устройства машин высокого давления явился, наконец, первый локомотив. О том перевороте, который произошел вследствие этого в сношениях людей и во всем строе нашей жизни, вряд ли следует распространяться. По тому значению, которое пар приобретал хотя и медленно, но тем надежнее для промышленной, а следовательно и общественной жизни человечества, столетие со времен открытия Уатта может по справедливости назваться «столетием пара».

Р. Клаузиус [1]).

«О запасах энергии в природе», 1885.

Изобретение паровой машины.

Появление машин и фабричного способа производства во второй половине XVIII века объясняется не одной потребностью в усовершенствованной технике, но и тем уровнем, которого достигли естественные науки и техника в это время.

[1]) Рудольф Клаузиус — знаменитый германский физик (1822 — 1888).

До половины XVIII века эти изобретения были немыслимы по той простой причине, что наука и техника стояли на слишком низкой ступени развития. Так, изобретение паровой машины было результатом приобретенных к этому времени научных сведений, и постепенное развитие ее происходило одновременно с развитием естественных наук. Сэвери и Ньюкомен при устройстве ими паровой машины основывались на великом открытии давления воздуха [1]), сделанном Торричелли в 1643 г., тогда как до него думали, что природа не терпит пустого пространства. Причина несовершенства изобретенной ими паровой машины коренилась в отсутствии научных сведений о теплоте и ее свойствах. Точный прибор для измерения теплоты был впервые изобретен в 1650 г. голландцем Дреббелем в виде термометра с раствором медного купороса; лишь в 1714 г. Фаренгейт воспользовался ртутью для измерения температуры; за ним уже последовали термометры Реомюра в 1730 г. и Цельсия в 1741 г. Далее, в 1760 г. профессором университета в Глазго Блэком были сделаны важные открытия в области теории теплоты: он выяснил понятие скрытой теплоты и удельной теплоты. Одним из наиболее прилежных учеников Блэка был механик Уатт. Приобрев новые сведения из теории теплоты, Уатт приступил к усовершенствованию паровой машины и сделал свое великое изобретение.

Таким образом, на изобретение паровой машины наука имела огромное влияние, и без открытий, сделанных в области физики, это изобретение было бы немыслимо . . . Ясно, что изобретение машин обусловливалось нуждой в них и стало возможным благодаря успехам в области естественных наук и техники, и при отсутствии последних появление машин во второй половине XVIII столетия было бы немыслимо даже при существовании самой сильной потребности в них: машины появились именно во второй половине XVIII века по той причине, что лишь к этому времени термофизика и механика достигли необходимого для сложных технических изобретений уровня развития.

И. Кулишер.

«Лекции по истории экономического быта», 1916.

[1]) Поршень в цилиндре этих машин двигался под давлением пара только вверх, опускался же он давлением атмосферы (отсюда и название машины Ньюкомена — «атмосферная» машина). — *Сост.*

Паровые машины.

I. Расчет мощности.

Если сильно нагреть сосуд с водою, плотно закрытый крышкой, то образующийся при этом пар с силою ищет себе выхода и поднимает крышку, так что пар может выйти наружу. Чем тяжелее крышка, тем больше может быть давление пара в сосуде, и если крышку при-

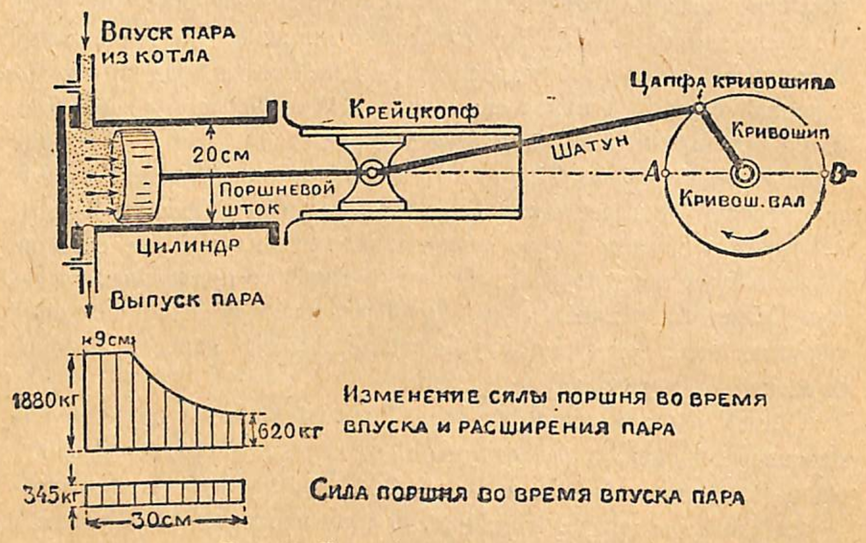


Рис. 11. Ход работы в паровой машине.

винтить, то сосуд может, наконец, взорваться, даже если стенки сосуда очень толсты. Отсюда видно, что пар может производить огромное давление на стенки сосуда.

При работе паровой машины вода в большом котле нагревается до того, что пар достигает весьма высокого давления. Пар подводится к цилиндру паровой машины посредством трубы (рис. 11). Пар стремится расшириться и вследствие этого с большой силой отталкивает поршень машины. Если диаметр поршня составляет, например, 20 *см*, то площадь, на которую пар производит давление, равна $\frac{1}{4} \times 3\frac{1}{7} \times 20^2 = 314$ *см²*. Пусть давление пара настолько высоко, что на каждый кв. сантиметр сила давления

равна 6 *кг* [т.-е. давление пара — 6 атмосфер]. Мы можем себе представить, что на поршень давит 314 отдельных сил в 6 *кг* каждая, так что общая сила поршня равна около 1880 *кг*.

Под действием этой силы поршень движется вперед до того момента, когда труба, подводящая пар, будет закрыта, так что свежий пар больше не сможет поступать в цилиндр.

Однако, пар высокого давления, находящийся в замкнутом пространстве, все еще стремится расшириться и давит на поршень. Представим себе пружину, которая была сильно сжата. Когда пружина расширяется, она продолжает давить, но давление это становится

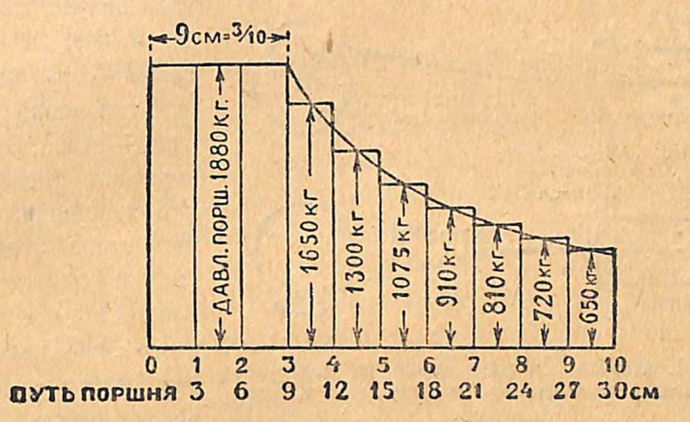


Рис. 12. Паровая диаграмма паровой машины.

постепенно меньше. Так же падает и сила давления пара во время его расширения, становясь все меньше [1]).

Нагляднее всего можно представить себе явления, происходящие в цилиндре, если силы давления нанести на чертеж в виде кривой или «диаграммы», как показано на черт. 11 внизу. Здесь силы представлены в виде параллельных прямых так, что 1 *мм* их длины соответствует 150 *кг* давления; таким образом, сила в 1880 *кг* представлена на чертеже отрезков в $12\frac{1}{2}$ *мм*. Путь поршня или его «ход», который взят длиною в 30 *см*, отложен горизонтально в масштабе 1:15, т.-е. представлен отрезком в 20 *мм*. Этот путь разделен на участки в 2 *мм*, т.-е. в $\frac{1}{10}$ долю полного хода поршня, и для

---

[1]) *Упражнение*. Согласно какому физическому закону?

каждой из этих точек рассчитана сила поршня. Пусть подвод пара прекращается на $^3/_{10}$ хода поршня, т.-е. на расстоянии 9 *см*. До этого момента сила поршня остается неизменной—1880 *кг*; после этого она быстро падает и составляет, например, на $^4/_{10}$ хода — 1410 *кг*, на $^5/_{10}$ — 1128 *кг* и в конце хода только 806 *кг* [1]).

Поршень передает свою силу поршневому штоку, который на другом своем конце направляется крейцкопфом (ползуном), скользящим в неподвижных салазках. Отсюда сила передается через шатун на кривошип и вращает несущий его вал. Когда цапфа кривошипа приходит в положение *B*, поршень дальше двигаться не может, а отодвигается — при дальнейшем движении кривошипа — назад. При этом поршень выталкивает пар из цилиндра на воздух после того, как выпуск туда своевременно открывается; для этого тоже приходится затрачивать известную силу, которая составляет около 1,1 *кг* на *см*^{2}, так что общее противодавление на поршень составляет $1{,}1 \times 314 = 345$ *кг*. Если представить это графически, то так как давление остается постоянным на всей длине обратного хода поршня, мы получаем линию, которая (черт. 11 внизу) проходит на одинаковой высоте.

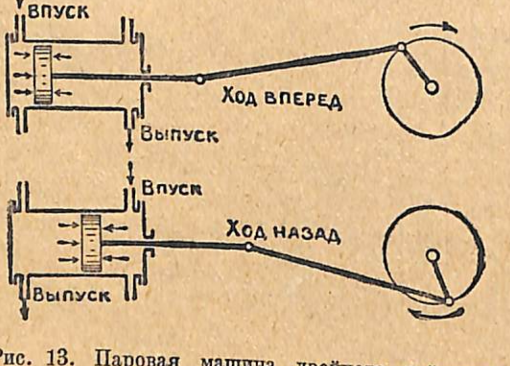


Рис. 13. Паровая машина двойного действия в различных положениях кривошипа (ход вперед и назад).

Как теперь определить работу, которую произвел пар при одном ходе поршня взад и вперед (т.-е. при одном полном ходе). Если не считать потерь на трение, работа эта равна работе, которую кривошип передает на вал машины, независимо от соотношений, выбранных для промежуточной передачи.

---

[1]) *Упражнение*. Проверьте эти числа вычислением (на основании какого закона?). — *Сост.*

Эту работу поршня очень быстро можно вычислить с помощью диаграммы сил поршня по рис. 11. На рис. 12 та же диаграмма представлена в более крупном масштабе. От точки 0 до точки 3 сила поршня составляет 1880 *кг*; путь равен 9 *см*, следовательно, произведенная работа равна $1880 \times 0{,}09 = 169{,}20$ килограммометров. Между точками 3 и 4 давление поршня изменяется. Для этого пути, длина которого равна 3 *см*, мы берем поэтому среднюю силу, которая составляет $\frac{1880 + 1410}{2} =$ около 1650 *кг*, и для произведенной работы получаем величину $1650 \times 0{,}03 = 49{,}5$ килограммометра. Таким же образом поступаем и дальше, определяя на каждом отрезке среднюю силу и помножая ее на путь — 0,03 метра. Складывая все полученные силы, найдем 383 *кгм* [1]).

Приведенный расчет можно представить себе и так, что им определяется **площадь диаграммы**. Первая часть работы поршня, 1880 *кг* $\times 0{,}09$ *мм*, представляет собою не что иное как площадь прямоугольника с основанием в 9 *см*. После этого мы определим площадь каждого отдельного прямоугольника с основанием 3 *см* и высотой, равной средней поршневой силе. Складывая все эти площади, получаем общую площадь диаграммы. Отсюда получается замечательный результат: развиваемая поршнем **работа** может быть измерена **площадью диаграммы**. Этот вывод имеет большое значение для исследования всех поршневых машин.

Полученные нами 383 *кгм* представляют собою ту работу, которая была развита при движении поршня вперед, т.-е. направо. При обратном ходе налево поршень должен быть передвинут против постоянного давления в 345 *кг* на пути 0,3 метра, так что из вычисленной работы нужно отнять работу на противодавление в $345 \times 0{,}3 = 103$ *кгм*. Таким образом машина в действительности за полный ход поршня вперед и назад развивает $383 - 103 = 280$ *кгм*.

Чтобы получить действительную работу, отданную кривошипному валу, мы должны принять еще во внимание работу на преодоление сопротивления трению. В небольшой простой машине, о которой здесь идет речь, эта потеря очень велика и составляет около 30%; следовательно, каждый полный ход поршня дает 196 килограммометров.

---

[1]) *Упражнение*. Проверьте этот расчет. — *Сост.*

На практике паровые машины этого рода строятся всегда с закрытым со всех сторон цилиндром, так что, когда поршень возвращается назад, пар может вступать в цилиндр с другой стороны (рис. 13). В такой паровой машине д в о й н о г о д е й с т в и я развивается работа в 196 *кгм* дважды, так что действительная работа при одном полном обороте вала кривошипа составляет 392 килограммометра.

Проф. *Г. Ганфштенгель.*

«Техническое мышление», 1919.

Примечание. Чтобы определить *мощность* паровой машины, — т.-е. количество работы, выполняемое ею в 1 сек. (в лошадиных силах), нужно разделить полученную сейчас величину работы за 1 ход поршня на продолжительность хода в секундах (или ее долях) и на 75, — так как 1 лош. сила = 75 *кгм* в секунду. Если, например, в рассмотренном случае поршень делает 100 полных ходов в *минуту*, то *секундная* работа его равна

$$\frac{392 \times 100}{60} = 65{,}3 \text{ кгм.}$$

А мощность:

$$653 : 75 = 8{,}7 \text{ лош. сил.}$$

Сост.

II. Источники потерь энергии.

Рисунок 14 изображает схематически паровую установку. Рассмотрим сначала верхнюю часть рисунка. Слева изображен п а р о в о й к о т е л. Количество тепла, необходимое для подогрева котла, вводится в топку в виде горючего. Постараемся проследить судьбу этого введенного в топку тепла при всех процессах установки.

В т о п к е п а р о в о г о к о т л а уголь, как известно, сгорает вследствие того, что при достаточно высокой температуре, так называемой температуре сгорания, через промежутки колосниковой решетки вводится достаточное количество воздуха. После этого образующиеся при сгорании газы уходят через так называемые дымоходы в трубу и, проходя по этому пути, отдают через поверхность нагрева парового котла свое тепло воде котла. При этом, как и при каждом техническом процессе, происходят потери, которые, конечно, должны быть по возможности сокращены; здесь приходится считаться с тепловой потерей приблизительно около 30%. Таким

образом, образующийся пар заключает в себе уже всего лишь около 75% образовавшейся в топке теплоты.

К а к о в ы ж е з д е с ь и с т о ч н и к и п о т е р ь?

Прежде всего почти никогда не удается достичь полного сгорания топлива. Неполное сгорание является, таким образом, одной из причин потерь, которую, впрочем, можно при умелом обслуживании топки довести даже до 1%. Далее, продукты сгорания — газы—выходят в трубу с довольно высокой температурой, а это означает, что в отходящих газах заключается еще теплота, уходящая

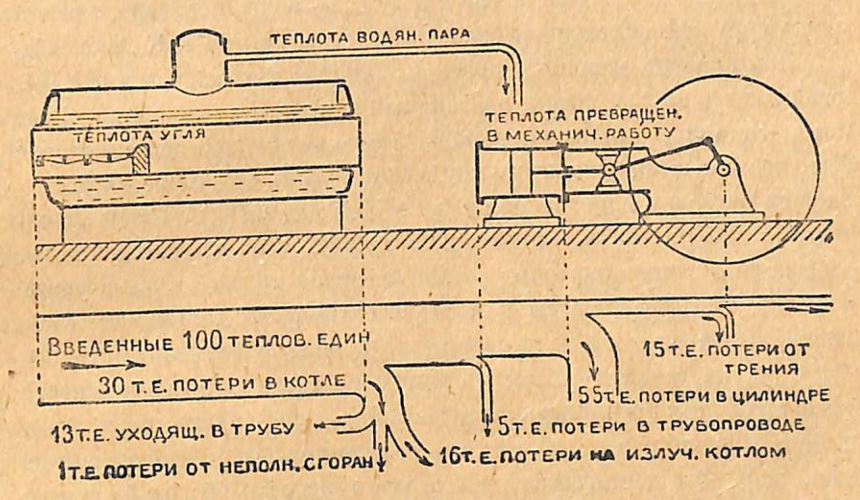


Рис. 14. Тепловой баланс поршневой паровой машины.

через трубу неиспользованной. Это количество теплоты мы можем принять равным 13%. Наконец, сам котел излучает во все стороны теплоту, которая, таким образом, является потерянной для парообразования. Количество этой излучаемой теплоты может быть принято равным 16%, так что все три источника дают вместе около 30% потерь. Остальные 70% введенной в топку теплоты переходят в пар.

Этот процесс распределения тепла, или, как принято говорить, тепловой баланс, легко уяснить себе на основании рис. 14. На нем представлены под котлом 100 введенных в котельную топку тепловых единиц и 30% общих потерь в котле. Эти 30% делятся на 3 части, о которых было сказано выше. В паропровод поступают, таким образом, только 70 тепловых единиц.

Водяной пар, как «носитель» теплоты, переносит эту последнюю через паропроводы к цилиндру паровой машины. На этом пути происходит некоторая потеря теплоты, вследствие наружного ее излучения паропроводом. Эту потерю стараются по возможности уменьшить, для чего паропровод покрывается тепловым изолятором, например, асбестом или кизельгуром. Такая плохо проводящая теплоту масса удерживает ее тем самым внутри пара. На рис. 14 в тепловом балансе потеря в трубопроводах принята в 5%. Таким образом, до этого места из 100 Т. Е. [1]), введенных в топку котла, 30 Т. Е. были потеряны в котле и 5 Т. Е. — в трубопроводе, так что к цилиндру паровой машины подводится всего лишь 65 Т. Е., или 65%.

Под паровой машиной, представленной в верхней части рис. 14, изображен тепловой поток, подводимый к паровым цилиндрам. Этот поток составляет приблизительно 65% того количества тепла, которое было введено в топку парового котла в виде угля. Схема рис. 14 указывает на потерю в паровом цилиндре в 55 Т. Е. (55%). Такая значительная потеря тепла, приводящая к тому, что из всей теплоты, введенной в топку парового котла, остаются только 10%, которые и могут быть превращены в механическую работу, вызывает стремление добиться тех или иных конструктивных улучшений машины.

Одна из таких попыток состоит в том, чтобы по возможности уменьшить так называемую конденсацию при впуске пара, т.-е. потерю в теплоте пара вследствие уплотнения его в момент впуска в цилиндр. Это достигается прежде всего двойной рубашкой цилиндра, омываемой свежим горячим паром, так что паровой цилиндр нагревается снаружи. В паровых локомобилях цилиндр омывается в большинстве случаев дымовыми газами, температура которых еще выше, чем температура пара. Однако, это возможно только в том случае, когда котел и паровая машина соединены до известной степени в одно целое (аггрегат), как, например, это делается у локомобилей. В стационарных паровых установках котлы и паровые машины расположены пространственно отдельно друг от друга. Поэтому у таких машин может только применяться омывание цилиндра свежим паром. Но эта рубашка недостаточна; постепенно для уменьшения конденсации при впуске пара стали применять еще и другие средства. Уже Джемс Уатт, один из самых значительных усовершенствователей паровой машины, установил в конце XVIII столетия, что для уменьшения конденсирования пара при впуске нельзя заставлять пар расширяться от котельного давления до давления выпуска в одном и том же цилиндре, при чем он нашел, что выходящий пар охлаждает стенки цилиндра, вследствие чего при входе свежего пара пар этот тотчас же теряет некоторое количество тепла и осаждается на стенках цилиндра. Для разъяснения этого процесса обратимся к таблице пара. Предположим, что давление входящего пара (избыточное) равно 14 атм.; этому давлению соответствует температура в 197,24°. Во время расширения пара, т.-е. при уменьшении его давления, уменьшается и температура, так что отработавший пар имеет, например, температуру несколько выше 100°. При применении же конденсации температура даже значительно ниже 100°. До этой температуры охлаждаются и стенки цилиндра, хотя и не вполне, но все же приближаясь к ней, так как выходящий пар омывает стенки. Когда же к той же стенке подходит свежий пар, то разница температур достигает почти 100°. Поэтому свежий пар должен сначала отдать часть своей теплоты для нагрева стенок цилиндра, т.-е. он должен израсходовать часть теплоты, которая является потерянной в смысле использования ее для производства работы. Из этих соображений Джемс Уатт предлагал распределить работу пара между несколькими цилиндрами. Поясним принцип действия такой машины с многократным расширением (машина-компаунд). Пусть, например, часть работы I должна быть произведена в цилиндре высокого давления (ц. в. д.), часть работы II — в цилиндре среднего давления (ц. с. д.) и часть работы III — в цилиндре низкого давления (ц. н. д.). Пар, поступающий в цилиндр высокого давления с давлением в 14 атм., расширяется в нем до 6,5 атм. Этому числу атмосфер соответствует температура в 166,5° Ц., поэтому падение температуры в этом цилиндре равно не 100°, как при машине с одним цилиндром, а всего лишь 197 — — 166,5 = 30,5°. Пар, выходящий из цилиндра высокого давления с давлением в 6,5 атм., поступает в цилиндр среднего давления и расширяется там до давления в 3 атм. — соответственно температуре в 143°. Таким образом, в цилиндре среднего давления падение температуры равно 166,5 — 143 = 23,5°. Этот пар переходит затем в цилиндр низкого давления и расширяется в нем до давления немногим выше 1 атм. — соответственно температуре около 100°. Таким

[1]) Т. Е. здесь и далее сокращенно означают: тепловые единицы. — *Сост.*

образом, в цилиндре низкого давления падение температуры равно 143 — 100 = 43°. Благодаря такому распределению работы пара между тремя цилиндрами падение температуры в каждом из них в отдельности невелико, и тем самым достигается соответственное уменьшение конденсации пара при впуске.

Конечно, необязательно, чтобы пар расширялся непременно в трех цилиндрах. Если начальное давление, т.-е. давление в котле, низко, то можно обойтись и двумя цилиндрами, или, как выражаются в этом случае, — машиной с двойным расширением. И, наоборот, у судовых машин, работающих при значительно высшем давлении, чем сухопутные машины, устраивают даже по четыре цилиндра.

Другое средство для уменьшения конденсации при впуске пара состоит в применении перегретого пара. Сущность применения перегретого пара состоит в том, что его температура, благодаря подводу тепла, выше, чем температура влажного пара. Для получения перегретого пара пар из котла подводят не непосредственно к цилиндру машины, а пропускают сначала через змеевик, устроенный в дымоходе парового котла, где обладающие высокой температурой газы и нагревают этот влажный пар. Так, например, посредством пароперегревателя пар с давлением в 10 атм. (избыточн.) или 11 атм. абс., имеющий по таблице температуру в 183°, можно нагреть до температуры в 300° и выше. При этом мы говорим, что температура перегрева равна 300 — 183 = 117°.

При введении такого пара в цилиндр он, прежде чем конденсироваться, должен охладиться с 300° до 183°. Другими словами, можно сказать, что такой пар имеет определенный запас теплоты, препятствующий ему конденсироваться тотчас же по вступлении в цилиндр. Конденсация эта будет задерживаться также еще и потому, что средняя температура стенок цилиндра повышается под влиянием более высокой температуры входящего пара, благодаря чему происходит более благоприятное выравнивание температур. Выгода от работы на перегретом паре настолько очевидна, что в настоящее время вообще ни одна установка не строится без перегрева пара, независимо от того, какая система машин в данном случае применяется. Вначале перегретый пар в паровых установках вызывал то затруднение, что смазочное масло для поршней при столь высокой температуре сгорало. Однако, благодаря применению минеральных масл это затруднение было преодолено, так как масла эти допускают весьма высокую температуру, не сгорая.

В заключение рассмотрения процессов, развивающихся в паровом цилиндре при превращении теплоты пара в механическую работу, обратимся к описанию совершения механической работы внутри паровой машины. Прежде всего, у того места цилиндра, где поршневой шток проходит через его крышку, происходят потери от трения. Кроме того, такие же потери происходят у цапф крейцкопфа и у его направляющих, а также у цапф коленчатого вала и в подшипниках. Здесь дело идет, таким образом, о потере в механической работе (работа трения). Потери на трение необходимо по возможности уменьшать, путем возможно более точной обработки трущихся поверхностей и хорошей их смазки.

Во всяком случае можно считать, что из остающихся после превращения теплоты в механическую работу 10% на трение в паровой машине уходит еще 1,5%. Это соответствует механическому коэффициенту полезного действия паровой машины в 0,85.

Все вышеприведенные цифры практически достижимы. Разумеется, при различных системах и при различных конструкциях установки эти цифры могут отклоняться в ту или другую сторону. В вышеприведенном случае, если принять во внимание все потери, согласно схеме рис. 14, из введенных в паровой котел 100 Т. Е. остаются всего лишь 8,5 Т. Е., которые могут быть отданы дальше в форме механической работы. Величина эта, конечно, мала. Однако, существующие в настоящее время установки уже не могут достичь значительного улучшения, и задача будущего состоит в поднятии экономичности работы паровых установок путем новых усовершенствований.

Механическая работа может быть преобразована посредством динамо-машины в электрическую работу или же непосредственно передана какой-либо рабочей машине или трансмиссии [1]).

Проф. *А. Фрейнд.*

«Техника», 1924.

[1]) О трансмиссии — см. далее, стр. 98.

Паровые турбины.

Посредством водяного пара приводятся в действие не только рассмотренные нами поршневые машины, но и более молодые паровые турбины. Поршневые машины по своей конструкции имеют тот недостаток, что они работают с попеременно возвратно движущимися массами. Это обстоятельство привело в течение последних десятилетий к постепенному развитию паровых турбин больших мощностей. У паровых турбин, вместо попеременно возвратного движения поршня, имеется круговое движение колеса с лопатками, в которые ударяет пар. Пар в этом случае приводит в движение колесо, подобно тому, как вода движет водяные колеса или водяные турбины, но только, конечно, конструкция паровых турбин приспособлена к своеобразным условиям расширения пара. Благодаря возможности быстрее пускать в ход вращающиеся колеса, паровые турбины развились в машины с большим количеством оборотов и — тем самым — с меньшим весом. Они занимают значительно меньше места и много легче, нежели поршневые машины той же мощности. Так как размеры их меньше, чем размеры поршневых машин, то они могут быть устроены и на значительно большую мощность. Существуют паровые турбины мощностью до 50 000 л. с., в то время как мощность поршневых паровых машин доходит всего до 6 000 л. с. Паровые турбины применяются с успехом в особенности на судах, где лег-

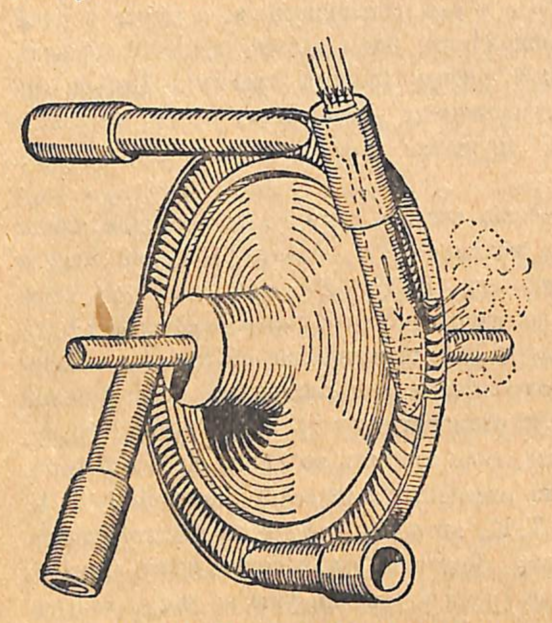


Рис. 15. Действие паровой машины.

кость машины и незначительность занимаемого ею пространства играют главную роль, а также и на электрических центральных станциях.

Проф. *А. Фрейнд.*

«Техника», *1924.*

Двигатели внутреннего сгорания.

Двигателями внутреннего сгорания называются такие силовые машины, в цилиндре которых подводимое горючее сгорает непосредственно, при чем теплота сгорания — в тесной связи с самим процессом сгорания — превращается тут же в механическую работу.

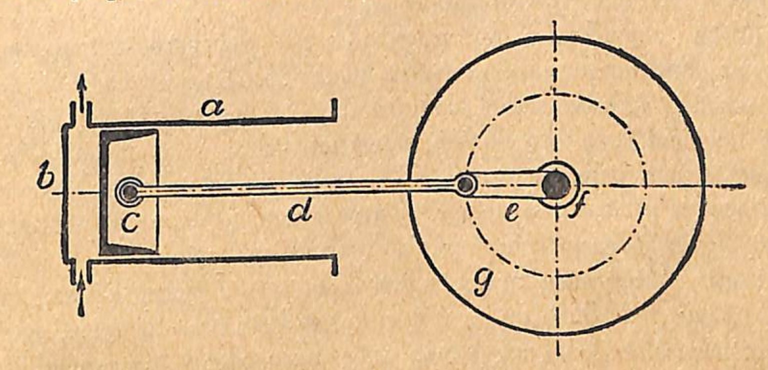


Рис. 16. Схема газового двигателя.

Для работы двигателей внутреннего сгорания применяются различные сорта газообразных и жидких горючих. Мы начнем наше описание с двигателей, работающих газом.

На рис. 16 изображена схема газового двигателя. Цилиндр *a* с левой стороны закрыт крышкой *b*; правая сторона его открыта. Поршень *c* движется попеременно возвратно; на рисунке он указан в левом мертвом положении. Из рисунка видно, что в этом положении поршень не доходит вплотную к крышке цилиндра, как у паровых машин, а оставляет некоторое пространство свободным. Это пространство необходимо для того, чтобы скопить известное количество горючего, с которым можно было бы оперировать во время рабочего процесса. Поршень *c* передает работу посредством шатуна *d* на колено *e* и вал *f*, вращающийся с соответственной скоростью

и увлекающий за собою маховое колесо g. От махового колеса работа может быть передана непосредственно дальше, для чего оно устроено как ременной шкив. Но можно также рядом с маховым колесом насадить на коленчатый вал и ременной шкив, от которого и берется дальнейший привод. Машина эта, в отличие от паровой, работает в четыре такта, т.-е. одному рабочему процессу соответствуют 4 хода поршня или, что то же самое, 2 оборота вала. Предположим, что сначала в цилиндре нет горючей смеси. В продолжение хода I поршня слева направо всасывается смесь из газа и воздуха (при чем на 1 часть газа приходится около 7 частей воздуха; такое соотношение необходимо поддерживать в силу того, что это количество воздуха требуется для полного сгорания газа).

Когда поршень c достигает правого мертвого положения, цилиндр наполняется смесью из газа и воздуха. В этот момент впускной клапан автоматически закрывается самим двигателем; благодаря инерции махового колеса, поршень двигается обратно влево, и смесь в цилиндре сжимается. В момент, когда поршень доходит до левого мертвого положения, сжатие смеси достигает 6 — 7 атм. В этот момент смесь зажигается, благодаря чему происходит сгорание или взрыв. Зажигание производится здесь либо посредством калильной трубки, входящей извне и слегка выдающейся над внутренней поверхностью стенок цилиндра, либо посредством электрической искры, даваемой в требуемый момент посредством электромагнитного зажигательного аппарата. При сгорании или взрыве давление сразу увеличивается, приблизительно до 18 атм. (избыточно). Легко понять, что при сгорании смеси из воздуха и газа продукты сгорания стремятся расшириться и продвинуть поршень дальше вправо. При этом давление, конечно, падает до конца хода, т.-е. до момента второго достижения поршнем правого мертвого положения. В течение III хода производится работа, почему этот ход и называют «рабочим» ходом машины.

Затем во время хода IV открывается выпускной клапан, и сгоревшая и использованная смесь выталкивается.

Таким образом, четыре периода такого двигателя суть:

1. Период всасывания.
2. Период сжатия.
3. Период взрыва и расширения.
4. Период выпуска.

Понятно, что несколько таких цилиндров могут работать сообща на один и тот же коленчатый вал и что в этом случае лучше, если отдельные периоды происходят во всех цилиндрах не одновременно, а последовательно, чем достигается более равномерное распределение работы.

Экономичность газовых двигателей, в особенности двигателей, работающих на светильном газе, представлена на рис. 17. Сверху еще раз изображен газовый двигатель, приводящий в движение динамо-машину. Наверху цилиндра изображен впусковой клапан, внизу — выпускной. Под изображением газового двигателя приведен рисунок,

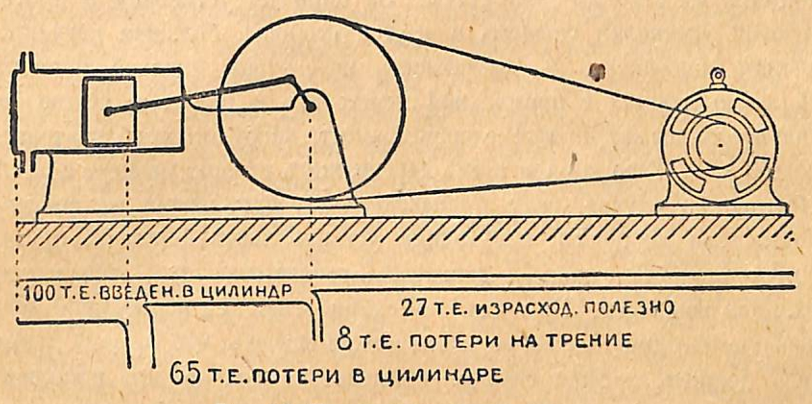


Рис. 17. Баланс газового двигателя.

иллюстрирующий экономичность его работы. Обратимся сначала к нижней части рисунка, которая показывает, что к машине подводится 100 Т. Е. [1]). В цилиндре происходит превращение в механическую работу заключающейся в газе теплоты. При этом превращении около 65 Т. Е., или 65% теряется. Кроме того, на трение (поршень, цапфы, подшипники) теряется еще 8 Т. Е. (8%), так что 27 Т. Е., или 27%, могут быть использованы на маховом колесе для приведения в действие соединенной с двигателем машины. Сравним эту величину с соответственной величиной паровой установки по рис. 14. Там из подведенных 100 Т. Е. оставалось для дальнейшей отдачи всего лишь 8,5 Т. Е. Отсюда вытекает превосходство газового двигателя перед паровой машиной.

---

[1]) Тепловых единиц.

Конечно, при газовом двигателе не может иметь место отопление продуктами выпуска фабричных помещений, как это производится с помощью отработавшего пара в паровой машине. Зато при газовом двигателе получается экономия благодаря тому, что нет надобности в паровом котле. Однако, этим еще не сказано, что работа газового двигателя обходится дешевле во всех случаях, ибо нужно сравнить еще стоимость светильного газа и горючего для котла. При решении вопроса о применении газового двигателя или паровой машины, кроме того, важную роль играет и вопрос о занимаемом машиной пространстве, при чем в этом отношении преимущество остается за газовым двигателем. За паровую установку и против газовой установки говорит, с другой стороны, большая регулировочная способность и возможность перегрузки паровой машины. Паровую машину с нормальной мощностью в 100 л. с. можно без значительного нарушения ее экономичности нагрузить приблизительно до 150 л. с. Газовый двигатель перегружать в таком размере нельзя. Поэтому, в случае, если производство требует время от времени повышения мощности, необходимо устанавливать больший, против обычной работы, газовый двигатель, соответствующий этой максимальной мощности. Но тогда машина работает при нормальной мощности невыгодно. Таким образом, можно сказать, что газовый двигатель должен, вообще говоря, применяться только для приблизительно неизменной нагрузки и не для весьма больших мощностей.

К двигателям внутреннего сгорания, помимо газовых двигателей, принадлежат также и двигатели, работающие ж и д к и м и г о р ю ч и м и, как бензин, бензол, дегтярное масло и т. д. Эти двигатели отличаются от газовых двигателей, главным образом, тем, что к цилиндру пристроен так называемый «карбюратор»; назначение карбюратора в том, чтобы предварительно превращать жидкое горючее в газ и смешивать его с воздухом. В дальнейшем это горючее работает точно так же, как и смесь в газовых двигателях; в работе тех и других имеются некоторые различия в размерах отдельных потерь, но эти различия в общем не существенны и не важны с точки зрения стоящих перед нами общих вопросов.

Иначе, нежели все другие двигатели внутреннего сгорания, работает так называемый д и з е л ь - м о т о р, являющийся в настоящее время одной из наиболее экономичных тепловых машин.

Дизель-мотор работает так же в четыре такта, как уже названные двигатели внутреннего сгорания. Но он всасывает не смесь газа и воздуха или какую-нибудь другую горючую жидкость, а только в о з д у х, что происходит в течение первого хода поршня. При втором ходе этот воздух сжимается. При этом получается чрезвычайно высокая температура, и в этот горячий воздух в левом мертвом положении поршня впрыскивается какая-либо горючая жидкость,— например, дегтярное масло,—которая и сгорает. Таким образом, в тот момент, когда у других двигателей внутреннего сгорания происходит собственно зажигание, у дизель-моторов в горячий воздух впрыскивается горючая жидкость. Благодаря этому, является возможность сжигать в цилиндре также и трудно воспламеняемые жидкости и притом с таким эффектом, что использование горючего по сравнению с тепловыми машинами, работающими на горючей смеси, увеличивается. Дизель-мотор работает, таким образом, весьма экономно и применяется, главным образом, в качестве приводной машины в электрических центральных станциях. Иногда дизель-моторы устанавливаются и на судах. Из 100% теплоты, подводимых вместе с горючей жидкостью, 36% переходят в этом моторе к охлаждающей воде, омывающей рубашку цилиндра, и 25% уходят с отработавшими газами и теряются на излучение. Собственно для работы машины в цилиндре остается 39%, из которых около $^1/_5$ части — 8% теряются на трение внутри машины, так что в конце концов из всей подведенной теплоты расходуется полезно 31%. Такой коэффициент полезного действия (31%) для дизель-моторов отнюдь не является максимальным: у больших машин он часто достигает и большей величины.

Как бы благоприятно ни было развитие двигателей внутреннего сгорания, все же будущее принадлежит г а з о в о й т у р б и н е, которая разовьется из поршневых двигателей точно так же, как паровая турбина произошла от поршневых паровых машин. Над усовершенствованием газовых турбин работают в настоящее время многочисленные конструкторы. Однако, до сих пор в нашем распоряжении нет еще такой машины, которая могла бы быть применена для практических целей в широком масштабе.

Проф. *А. Фрейнд.*

«Техника», 1924.

Трансмиссия.

Средством для передачи работы здесь являются ремни (или канаты) и шкивы, насаженные на валы; передача работы происходит силою натяжения ремней или канатов. На стене или у потолка фабричного помещения устанавливается на нескольких стенных или подвесных кронштейнах с подшипниками вал трансмиссии. На валу помещается главный приводный шкив — прямо напротив приводного шкива двигателя, расположенного на полу. Оба шкива охватывает бесконечный ремень, насаженный с некоторым натяжением (не очень большим). При ходе машины этот ремень увлекается трением о шкив машины и увлекает в свою очередь шкив вала трансмиссии, приводя последний во вращение. От различных других приводных шкивов вала трансмиссии (или при посредстве еще другой, промежуточной трансмиссии) приводятся в движение отдельные станки. Промежуточные передачи применяются при необходимости увеличить или уменьшить скорость вращения. Если главная трансмиссия делает, например, 80 оборотов в минуту, тогда как некоторые станки должны совершать 400 оборотов, то устраивают промежуточную передачу, например, на 160 оборотов; при этом шкив на последней ставится диаметром, равным половине диаметра приводного шкива на главном валу. Так как приводной ремень, захватывающий приводный шкив, движется со скоростью, равной окружной скорости шкива главной трансмиссии, диаметр же и окружность шкива на промежуточной передаче вдвое менее, то число оборотов передаточного вдвое больше числа оборотов главного вала. Далее, приводным шкивам передаточного вала к отдельным станкам придается диаметр в $2^1/_2$ раза больший, чем шкивы этих станков; благодаря этому, скорость вращения последних увеличивается в $2^1/_2$ раза, так что станки идут со скоростью $2 \times 2^1/_2 \times 80 = 400$ оборотов в минуту. Обратным путем, конечно, можно уменьшить скорость вращения.

Проф. *Л. Груммах.*

«Силы природы и их применения».

Паровой котел и холодильник.

В первое время после изобретения паровой машины для получения пара служил обыкновенный большой железный котел. Пару давали уходить, когда давление достигало 1 фунта на 1 квадр. дюйм [1]).

[1]) *Упражнение.* Выразить величину этого давления в атмосферах, принимая 1 килогр.=2,2 англ. фунта, а линейный дюйм=2,5 *см.* — *Сост.*

В действительности старые паровые машины приводились в движение вовсе не непосредственно силою пара, но давлением атмосферы. Назначение же пара состояло в том, чтобы выгонять воздух из цилиндра и затем, сгустившись, оставить пустое пространство. Однако, с течением времени опыт показал, что можно получить еще большую силу, если взять крепкий котел, развить в нем пары высокого давления и пользоваться непосредственно силою пара.

По мере совершенствования техники листовой стали и железа все более возрастает прочность котлов, и давления, которыми пользуются, становятся все выше и выше; в настоящее время нередко изготовляются котлы, рассчитанные на регулярное рабочее давление в 200 фунтов на 1 кв. дюйм [1]) и испытанные в полтора раза большим гидравлическим давлением.

Наиболее обычный тип котла — так называемый ланкаширский. Он состоит из большого цилиндра или корпуса, имеющего иногда до 9 футов и 6 дюймов в диаметре и 30 футов в длину, и делается из склепанных вместе стальных листов; через цилиндр от одного конца до другого проходят две «жаровые» трубы также из стальных листов.

Котел устанавливается внутри кирпичной кладки, в которой проделаны другие ходы, один под котлом и по одному с каждой стороны. Топка устраивается у передних концов двух жаровых цилиндрических труб; жар проходит через них к задней стороне, затем проникает вниз и через нижний ход возвращается к передней стороне. Достигнув передней стороны котла, жар разделяется и возвращается в заднюю часть по двум боковым ходам. Таким образом жар топки действует на большую поверхность и через нее может проникнуть в воду. У задней стороны котла дым через дымовую трубу уходит в атмосферу.

Часто думают, что высокая фабричная труба служит для того только, чтобы выбрасывать дым в области, где он менее вреден, но это не так. Главная цель трубы — создавать сильную тягу. Поэтому в некоторых случаях можно обойтись без высокой дымовой трубы, и воздух продувается через печь с помощью вентилятора или струи пара. Нередко можно из имеющейся машины и котла получить значительно больше энергии, если присоединить вентилятор или паровую струю для увеличения тяги.

[1]) Выразить в атмосферах. — *Сост.*

Как мы видим, горячие дымовые газы из топки должны проходить длинный путь по различным трубам, соприкасаясь с поверхностью котла и таким образом отдавая ему большую часть своей теплоты. Тем не менее, достигая дымовой трубы, эти газы имеют еще очень высокую температуру, так что много теплоты пропадает даром. Чтобы сохранить часть этой теплоты, часто пользуются особым аппаратом, так называемым «экономейзером» или «подогревателем».

В этом последнем имеется большое число чугунных труб, вокруг которых и проходят дымовые газы перед тем, как они входят в дымовую трубу; через эти трубки пропускают воду, питающую котел. Таким образом удается захватить часть уходящей теплоты и перенести ее обратно в котел.

Есть еще и другое приспособление, так называемый «перегреватель», который находится сзади котла. Он состоит из большого числа трубок, через которые проходит пар на своем пути от котла в машину. Эти трубки, подобно подогревателю, нагреваются горячими газами, идущими в дымовую трубу, и таким образом пар получает значительное добавочное количество тепла.

Однако, при всем том в самых усовершенствованных котлах, снабженных подогревателями и перегревателями, количество теплоты, расходуемое с пользой, составляет лишь около 25° того количества, которое получается из угля, а остальные 75° уходят в трубу.

Есть другой тип котла — так называемый корнваллийский. Он отличается от ланкаширского тем, что имеет не две жаровых трубы, а только одну, и имеет меньшие размеры.

На пароходах котлы представляют некоторые отличия. Корпус гораздо короче, и кирпичной кладки здесь, конечно, нет. Вместо этого жаровые трубы входят сзади в стальной ящик, который называется огневой коробкой, и отсюда горячие газы возвращаются через множество небольших «дымогарных» трубок, которые проходят через котел над жаровой трубой от задней стороны его к передней. Дым уходит в стальную дымовую трубу, прикрепленную с передней стороны котла над дверцами печи.

В паровозах котел бывает вполне трубчатым, т.-е. в нем нет вовсе жаровых труб. Топка производится в задней камере, которая называется огневой или топочной коробкой. Из нее выходят несколько сот стальных трубок, имеющих около 3 дюймов в диаметре; они идут прямо через котел в другую камеру, так называемую дымовую

коробку, находящуюся впереди котла. Таким образом жар из топки проходит через эти трубки, которые целиком окружены водою.

Котел новейшего типа — так называемый «водотрубный» котел. В нем вода заключена в трубках, и вокруг них проходит жар из топки. Это выгодно в нескольких отношениях. Во-первых, так как трубки малы, то они могут быть очень тонкостенными в сравнении со стенками цилиндрического котла, так что теплота легче может проникать через них в воду. Далее, если какая-нибудь часть должна лопнуть, то это скорее всего случится лишь с малой трубкой, а не со стенкой самого котла, и благодаря этому значительно уменьшается опасность. Сказанное не следует понимать в том смысле, будто цилиндрические котлы часто подвержены взрывам. Взрывы не так часты, — но где приходится иметь дело с такими огромными силами, там необходимо считаться с возможностью взрыва, и в этом отношении водотрубный котел представляет меньшую опасность.

Водотрубные котлы очень часто употребляются на военных судах, а также в электрических генераторных станциях, так как они могут развить пары очень быстро, — что в критическую минуту весьма важно.

Главные опасности, которым подвержены паровые котлы, это — возможность взрыва вследствие чрезмерного давления или вследствие слишком большого понижения уровня воды.

От первой опасности котел защищен предохранительным клапаном. Этот клапан представляет собою пробку в крышке котла и нагружается тяжелой гирей или же более легким грузом на конце рычага; когда пар достигнет известного давления, он приподнимает пробку, и часть его выходит наружу. Таким образом, давление не может превысить определенной границы.

Против второй опасности служит клапан, который приводится в действие поплавком внутри котла. Когда поплавок опускается ниже определенного уровня, он открывает клапан, и пар издает пронзительный свист. Та же опасность предупреждается еще посредством другого приспособления — при помощи втулки из легкоплавкого металла вверху жаровой трубы. Пока пробка соприкасается с водой, она не плавится [почему?], но как только вода опустится ниже втулки, так что пробка становится сухой, она плавится и впускает пар в трубу, вследствие чего гасится огонь.

Если пар из машины выпускать не в воздух, но в разреженное пространство, то сила пара значительно увеличится, так как к действию пара, толкающего поршень с одной стороны, присоединяется тяга безвоздушного пространства, которое как бы тянет его с другой стороны (точнее: увеличивается разность давлений на обе стороны поршня, каковая разность и является в данном случае движущей силой). Аппарат, при помощи которого получается разреженное пространство, или «вакуум», называется холодильником, или конденсатором.

В своей наиболее распространенной форме холодильник сходен с небольшим трубчатым котлом. Войдя в цилиндр, пар вступает в соприкосновение с трубками, в которых циркулирующая холодная вода поддерживает низкую температуру. Сгустившийся пар (т.-е. вода) и воздух, который мог войти с паром, удаляются при помощи воздушного насоса. Таким образом, вода получается вновь, и ее можно накачать обратно в котел и снова использовать. Благодаря этому обстоятельству, такие «поверхностные холодильники» (в которых пар сгущается от соприкосновения с холодной п о в е р х н о с т ь ю) употребляются на всех пароходах. Охлаждающая вода накачивается через трубки другим насосом, который называется циркуляционным насосом.

Есть еще холодильники другого вида — так называемый «оросительный поверхностный холодильник». В нем пар проводится через трубки, находящиеся на крыше машинного здания или в каком-нибудь другом открытом месте. Воде дают капать вдоль наружной поверхности этих трубок, а теплота пара, находящегося внутри трубок, вызывает быстрое испарение воды. Так как испарение всегда сопровождается понижением температуры, то вследствие испарения воды трубки сильно охлаждаются, и пар внутри их сгущается. Получается странное, парадоксальное явление: пар при помощи своей собственной теплоты порождает холод, от которого он сам же сгущается! [1]).

Т. Корбин.

«Успехи современной техники», 1914.

[1]) Парадокс разрешается тем, что теплота пара затрачивается здесь на работу испарения воды и при этом исчезает, как таковая («скрытая» теплота): отсюда и охлаждение

Паровоз.

Механическая сила была применена для движения вагонов по дороге, образованной рельсами, впервые в форме паровой машины, и вплоть до сегодняшнего дня паровой локомотив является главным средством для этой цели. Правда, на некоторых линиях вошла в употребление электрическая тяга и даже с большим успехом; но ошибочно было бы думать, что паровоз доживает свои последние дни. Для коротких, оживленных линий лучше всего электрическая тяга, для больших линий — паровая.

Механизм, посредством которого пар вращает колеса паровоза, в принципе тот же, что и в стационарной [установленной на неподвижном основании] паровой машине. Обыкновенно имеются два цилиндра, каждый со своим поршнем и поршневым штоком, крейцкопфом, шатуном и кривошипом; оба кривошипа устанавливаются под прямым углом друг к другу, так что когда один поршень находится в конце своего хода, как раз изменяя свое направление и не выполняя поэтому никакой работы, другой поршень находится посредине хода и поэтому толкает сильнее всего. Золотник, который регулирует движение пара в цилиндры и из цилиндров, во многих случаях приводится в действие эксцентриком; но часто употребляются особые «парораспределители», в которых помощью системы рычагов движение самих кривошипов передается золотникам и приводит их в действие.

Паровой котел принадлежит к типу, так называемых «трубчатых» котлов, с «дымогарными трубами». В нем различают, во-первых, цилиндрическую часть из стальных листов, содержащую в себе воду, и во-вторых, до 200 или даже больше железных, медных или латунных труб, имеющих около 2 дюймов в диаметре и идущих от одного конца до другого [1]). Позади котла находится большая камера, так называемая «топочная коробка» или просто «топка» с дном, состоящим из ряда железных стержней — «колосников», образующих «колосниковую решетку», на которой разводится огонь. Жар от огня проходит через трубы в другую камеру на переднем

[1]) Не мешает добавить, что оба конца труб покрыты и наглухо вделываются в переднюю и заднюю стенки котла, так что полость труб нигде не сообщается с полостью котла, но с обоих концов открывается наружу.

конце, так называемую «дымовую коробку», на верхушке которой находится дымовая труба.

В дымовой коробке находится чрезвычайно важное приспособление, так называемый «конус»; изобретен он Джорджем Стефенсоном, и лишь благодаря ему удается получать в сравнительно небольшом котле достаточное количество пара. Нужно помнить, что котел паровоза гораздо меньше — по отношению к количеству пара, которое он должен развить, — чем стационарный котел. Именно поэтому, вместо одной или двух жаровых труб, в нем устраивается большое число узких труб, чтобы теплота могла переходить в воду через возможно большую поверхность. Но это влечет за собой то неудобство, что нагретые газы не могут проходить достаточно быстро через узкие трубы; кроме того, паровозный котел лишен того преимущества, которое есть у стационарного котла, а именно высокой дымовой трубы, создающей сильную тягу. Поэтому если не устроить какой-нибудь искусственной тяги, горение не будет происходить достаточно быстро.

В первое время это обстоятельство и составляло одно из главных затруднений для Стефенсона [изобретателя паровоза], пока он не напал на счастливую идею устроить упомянутый «конус». Это — труба, помещенная на дне дымовой коробки, с отверстием, направленным вверх к дымовой трубе; по ней пар проходит из цилиндров, вырывается мощной струей вверх в дымовую трубу и этим создает сильную тягу в дымогарных трубах котла. Такое продувание возможно, конечно, лишь во время движения паровоза; для того же, чтобы произвести тягу во время разводки паров или во время остановки на станции, имеется приспособление, благодаря которому можно направить струю пара в трубу прямо из котла, — что произведет, конечно, тот же эффект. Машинист может по произволу выпускать и останавливать эту струю пара.

«Паровой колпак», или просто «колпак» [1]), который так бросается в глаза в большинстве паровозов, служит для высушивания пара. Когда пар поднимается с поверхности воды, он уносит с собою значительное количество жидкой воды в виде капелек, образующих туман, — сам по себе пар прозрачен, — и если бы он проходил из котла прямо

[1]) Большею частью — цилиндрическое возвышение на корпусе паровоза позади дымовой трубы.

в цилиндры, вода тоже прошла бы туда и отчасти заполнила бы цилиндры. Пар поэтому пропускают из котла через особую трубу, открытый конец которой находится под верхней крышкой колпака, и пока пар пройдет от поверхности трубы до устья этой трубы, большая часть содержащейся в нем воды осядет [1]), и таким образом в цилиндры он проходит сухим. В некоторых паровозах, не имеющих колпака, та же цель достигается посредством длинной горизонтальной трубы внутри котла, под его верхней стенкой. Пар входит в трубу через отверстия на ее верхушке, благодаря чему достигается тот же результат, что и в колпаке.

Труба с паром проводится затем к цилиндрам через дымовую коробку, где температура очень высока, благодаря чему он еще больше высушивается.

Если значительное количество воды попадает в цилиндр паровой машины, то последствия могут быть очень серьезные. Вода [почти] столь же мало сжимаема, как кусок железа, и если бы ее оказалось больше, чем нужно для заполнения пространства, которое нормально остается между крайним положением поршня и крышкой на конце цилиндра, то поршень был бы задержан в своем движении совершенно так же, как если бы цилиндр был слишком короток. Весь механизм паровоза был бы внезапно остановлен, даже если бы ничего не сломалось. По всей вероятности, крышка цилиндра была бы выбита, как при взрыве. Когда паровоз начинает движение, его цилиндры холодны, и пар сгущается в них в большом количестве; для выпуска получившейся воды у обоих концов цилиндра приделано по небольшому крану. Эти «спускные краны» открываются и закрываются при помощи системы рычагов, которой управляет машинист. Он всегда открывает их вначале движения, выпуская таким образом воду, а вместе с нею и пар, который вырываясь производит знакомый всем громкий свистящий звук. Затем, когда цилиндры нагрелись, и пар перестает сгущаться, он закрывает краны [2]).

Т. Корбин.

«Успехи современной техники», 1914.

[1]) Сгустившаяся вода при помощи особого приспособления отводится обратно в котел.

[2]) Подробнее о паровозе и о физических явлениях вообще, наблюдаемых на железной дороге—см. книгу инж. Д. Д. Бизюкина «На железнодорожной станции» (из серии «Физика и химия в технических экскурсиях», изд. «Сеятель», 1924). *Сост.*

Мощность и лошадиная сила.

I.

Для оценки работы машины нужно обращать внимание на *время*, в течение которого машина совершила ту или иную работу. Так, машину, которая совершила работу в 500 килограммометров в продолжение 10 сек., мы предпочтем машине, совершившей работу в 750 *кг м*, но в 30 сек., потому что первая машина в *1 секунду* совершила 50 *кг м*, а вторая — 25 *кг м*; мы, очевидно, можем сказать, что первая машина вдвое полезнее для нас, в смысле работы, чем вторая. Для оценки машин нужно, следовательно, обращать внимание на *быстроту совершения ими работы*.

Этой быстроте и придают название *мощности* [1]). Мощность данной машины естественно принять прямо пропорциональною работе, совершенной машиною, и обратно пропорциональною времени, в течение которого эта работа совершена. *За меру мощности* машины принимается поэтому *величина работы, совершаемой ею в единицу времени, а за единицу мощности* — мощность такой машины, которая может производить единицу работы (например, 1 *кг м*) в единицу времени (например, в 1 сек.).

В технике принята, однако, другая единица мощности, а именно так называемая *«лошадиная сила»*: способность производить 75 килограммометров работы в секунду.

По названию можно было бы предположить, что такова действительно *мощность* лошади, — но оказывается, что средняя мощность лошади раза в два меньше этого. Интересно происхождение такой повышенной оценки мощности лошади. Англичанин Уатт, который настолько усовершенствовал паровую машину, что его можно считать ее изобретателем, одну из первых своих машин построил для одного

---

[1]) Человека, который может проявить большую силу, хотя бы и на короткое время, мы называем *сильным;* человека, который с уверенностью берется за большую работу и может действительно ее совершить, назовем *энергичным.* Название же *мощного* более подходит к человеку, который может в течение продолжительного времени совершать постоянно большую работу, — так что научные термины «энергия» и «мощность» в известной мере соответствуют житейскому их смыслу.

Б. В.

завода в Англии; при этом было предварительно условлено, что эта машина должна будет совершать в день такую же работу, какую в состоянии сделать сильная лошадь, — ибо раньше тот насос, для приведения которого в движение предназначалась паровая машина, работал с приводом в одну лошадь. Чтобы убедиться, удовлетворяет ли машина поставленным условиям, нужно было определить, какую работу может совершить лошадь в день. И вот, чтобы заполучить машину посильнее, заводчик заставил самую сильную свою лошадь, — а Англия славится своими рабочими лошадьми, — работать под ударами плетей без остановки в течение нескольких часов до полного изнеможения. При таких ненормальных условиях и получилась такая повышенная оценка мощности лошади. В виду этого происхождения «лошадиную силу» иногда называют «паровою лошадью».

Проф. *Б. П. Вейнберг.*

«Общий курс физики», 1908.

II.

Инженеру требуется установить машину для подъема пассажиров на четвертый этаж дома. Какой двигатель должен он взять для этой цели?

Считая высоту этажа 5 метров, находим высоту подъема 20 *м*. Вес человека, положим, 75 *кг*, или 5 пуд. Если клетка подъемника такова, что вмещает 4 чел., то общая работа поднятия есть $4 \cdot 75 \cdot 20 = 6000$ *кг м*. Работа на поднятие самой клетки не тратится, так как последняя имеет противовес; но часть работы, — положим, 20%, т.-е. 1200 *кг м*, — тратится на преодоление вредных препятствий, главным образом, трения.

Таким образом, двигатель должен совершить 7200 *кг м*. для подъема. Время подъема должно быть невелико, — скажем, 20 сек. Значит, за 1 сек. двигатель должен совершать $7200 : 20 = 360$ *кг м*. Остается теперь разделить это число на 75, чтобы получить мощность в лошадиных силах; $360 : 75 = 4{,}8$ *HP*. Буквы *HP* представляют общепринятое обозначение лошадиных сил, заимствованное у англичан. Итак, инженер должен взять двигатель приблизительно в 5 *HP;* конечно, он мог бы обойтись и более слабым двигателем, однако, увеличив время подъема.

Н. Н. Андреев.

«Закон сохранения энергии», 1922.

Индикаторные и эффективные лошадиные силы.

Допустим, что для машины низкого давления температура воды в котле 125°; следовательно, давление пара (соответствующее этой температуре кипения) — 1744 миллиметра ртутного столба [1]). Давление в холодильнике 90 *мм*, и следовательно, разность обоих давлений 1654 *мм* ртутного столба, или

$$1{,}033 \cdot \frac{1654}{760} = 2{,}25 \text{ кг веса на } см^2$$

Предположим далее, что площадь поршня 500 $см^2$ длина хода его 0,4 метра, и пусть поршень делает два хода в 1 секунду. Тогда произведенная в секунду работа пара на поршне равна (произведению силы на путь):

$$2{,}25 \cdot 500 \cdot 0{,}4 \cdot 2 = 900 \text{ кгм в секунду,}$$

или 12 лошадиных сил.

Это будет, как говорят, машина в 12 индикаторных лошадиных сил. Обыкновенно считают, что $^1/_4$ этой величины необходима на преодоление трения и других вредных сопротивлений самой машины, а значит для исполнения полезной работы остается 9 лошадиных сил. А потому эта машина будет, как говорят, машиной в 9 эффективных (или действительных) лошадиных сил.

Проф. *Э. Варбург.*

«Учебник опытной физики», 1907.

Теплота и работа.

I.

Окончательным результатом производимой работы является во многих случаях теплота. Спрашивается: какая должна быть произведена работа, чтобы результатом ее явилось определенное количество теплоты? Всем известно, конечно, что всякого рода величины могут быть измерены и что для всякого измерения необходимо иметь опре-

[1]) Это число находят в таблице давления насыщенного водяного пара при различных температурах. — *Сост.*

деленную единицу. За единицу количества теплоты берется то количество ее, которое способно нагреть один килограмм воды на 1° Ц. Эта единица количества теплоты называется калорией. За единицу работы мы принимаем ту работу, которая производится, когда тело, вес которого один килограмм, поднимается на высоту одного метра. Эта единица работы называется килограммо-метром. Вопрос является, следовательно, в такой форме: одна калория теплоты, превращаясь в работу, сколько может произвести работы? Или, формулируя точнее: сколько одна калория даст килограммо-метров работы? Или — наоборот: сколько нужно затратить килограммо-метров работы, чтобы в результате получилась одна калория теплоты?

Вопрос этот можно формулировать еще несколько иначе. Представим себе, что некоторое тело падает с высоты на землю, например, один килограмм воды падает с высоты 200 метров. Чтобы поднять это количество воды на ту же высоту, надо произвести работу в 200 килограммо-метров. Когда вода упадет вниз, эта работа превратится в теплоту; спрашивается: с какой высоты должен падать один килограмм воды для того, чтобы в момент удара о землю он нагрелся как раз на 1° Ц.? Число килограммо-метров работы, которая в результате может дать одну калорию, называется *механическим эквивалентом теплоты.* Весьма точные измерения показали, что это число равно 426, т.-е. что если вода упадет на землю с высоты 426 метров, то в момент удара она нагреется на 1° Ц.

Каким образом могло быть найдено это число? Для того, чтобы определить его, необходимо было рассмотреть разные случаи превращения работы в теплоту, измерить количество произведенной работы и количество теплоты, которая при этом получалась. Так как существуют весьма различные случаи перехода работы в теплоту (удар, трение, сжатие и т. д.), то и в весьма значительном числе различных случаев могли быть произведены таковые измерения. Во всех этих разнообразных случаях всегда оказывалось, что в результате определенной произведенной работы получается одно и то же определенное количество теплоты, а именно, одна калория теплоты на 426 килограммо-метров затраченной работы.

Проф. *О. Д. Хвольсон.*

«Популярные лекции об основных гипотезах физики», 1887.

II.

Общий принцип, по которому двигаются все наши тепловые двигатели, очень ясен и очень прост. Какое бы то ни было тело, — водяной пар, эфир, хлороформ, вообще газы — подвергаются в них попеременно то расширению, то сжатию в своем объеме. В период расширения тело производит усилие и толкает вперед поршень, двигающийся внутри насоса и передающий наружу, с помощью соответственных механических приспособлений, сумму усилий, работу, которую он получает. В период сжатия поршень, сделавшийся вновь свободным, возвращается в свое первоначальное положение.

В наших паровых машинах, например, вода, подвергнутая действию теплоты в котле, превращается в пар, т.-е. в такой степени расширяется там, что принимает объем в несколько сот раз больший; по мере того, как образуется этот пар, он толкает вперед или назад поршень, служащий двигателем. Каждый раз, как поршень приходит к концу своего пути, толкавший его пар приводится в сообщение с пустым и холодным пространством, где осаждается и сгущается; поршень, сделавшийся таким образом свободным, может итти назад под действием нового пара, толкающего его с противоположной стороны.

Попеременное расширение и сжатие тела, — такова причина, некоторым образом осязаемая, движения какого бы то ни было теплового двигателя. Попеременные прирост и убыль теплоты — такова действительная, но никак не осязаемая причина этих изменений объема и этих движений. Такой двигатель предполагает, следовательно, существование не только источника теплоты, нужного для расширения тела, но и источника холода, чтобы отнять от тела, подвергшегося расширению, то, что его расширило, и чтобы привести его в первоначальное состояние.

Один из важнейших вопросов естественно представляется здесь уму. Отдает ли тело, подвергаемое действию теплоты, источнику холода всю ту теплоту, которую оно получило от источника теплоты? Чтобы выразиться точнее, предположим, что мы измерили все количество теплоты, доставляемое воде, кипящей в паровом котле, а также всю теплоту, которая приходит в холодильник машины, принимая, впрочем, в расчет пассивные потери: будет ли существовать равенство между количеством сперва данным, потом опять найденным?

До 1842 г. все физики без исключения ответили бы утвердительно; все сказали бы, ни минуты не колеблясь: да, есть равенство между количеством теплоты, израсходованной и опять найденной; теплота может только рассеяться в разных телах, сообщив им более или менее высокую температуру, но невозможно, чтобы она перестала быть теплотою.

Теперь, напротив, нет ни одного физика, который бы еще мог так отвечать.

Каждый раз, когда действие теплоты на тело производит механическую работу, исчезает количество теплоты, строго пропорциональное произведенной работе. Обратно, каждый раз, когда механическая работа затрачена на изменение внутреннего равновесия тела, развивается количество теплоты, строго пропорциональное затраченной работе. Между работою, таким образом произведенною или затраченною, и теплотою, таким образом затраченною или произведенною, существует неизменное отношение, которое и составляет то, что называют *механическим эквивалентом теплоты*.

Таков великий закон, установленный в первый раз доктором Майером; таково основное положение, на котором покоится все здание механической теории теплоты.

Во всяком тепловом двигателе источник теплоты сообщает телу, на которое действует, количество теплоты, большее того, которое получает от этого тела источник холода, чтобы возвратить ему первоначальный объем; и разность этих двух количеств теплоты составляет то именно ее количество, которое доставляет нам работу машины. Каждая единица теплоты, таким образом израсходованная, переводится в четыреста двадцать пять [1]) единиц произведенной работы, или килограммометров. Таково числовое выражение механического эквивалента.

Каждый знает, что трение, удар, сжатие тел развивает теплоту: и вот количество теплоты, таким образом освобожденной, нисколько не зависит от самой природы тел, но исключительно от исполненной работы. Каждый раз, как совершается израсходование 425 килограммометров, развивается одна единица теплоты, одна калория.

А. Гирн [2]).

«Анализ вселенной», 1886.

---

[1]) По новейшим данным — 426 *кгм* — *Сост.*

[2]) Густав-Адольф Гирн (1815 — 1890) — знаменитый эльзасский физик и инженер (а также философ), один из основателей механической теории теплоты.

Типы двигателей, потребляющих топливо, и их отдача.

Главными типами двигателей с потреблением топлива являются: паровая машина, паровая турбина и тепловые двигатели (или двигатели внутреннего сгорания).

В паровой машине характерной частью является цилиндр, где расширяющийся пар совершает работу. Паровые турбины пользуются силою струи пара, ударяющей по лопаткам колеса, напоминающего водяное. Наконец, в тепловых двигателях (или двигателях внутреннего сгорания) газы, получающиеся от сгорания топлива в цилиндре, двигают поршень в этом цилиндре.

Отдача (или «коэффициент полезного действия») паровых машин весьма невелика: 10 — 18% [1]; значит, из каждой калории, полученной от топлива, только $1/10$ и никак не более $1/5$ превращаются в полезную механическую работу, остальное тепло уходит в окружающее машину пространство без пользы для нас.

Причин такой низкой отдачи несколько. Во-первых, вода в котле должна быть сперва нагрета до 100° Ц., а потом превращена в пар, на что уходит значительное количество тепла; затем котел, в котором образуется пар, и вообще вся машина теряет тепло в окружающее пространство; наконец, уже полученная из тепла пара работа частью вновь превращается в тепло от трения. Из всех этих причин третья наименее влияет на отдачу; зато первые две понижают коэффициент полезного действия приблизительно на 60%.

Немногим лучше с точки зрения отдачи и паровые турбины; только очень мощные турбины экономичнее паровых машин [2]), слабые же даже менее экономичны.

Конечно, техника употребляет все усилия, чтобы повысить отдачу паровых машин; но чем больше совершенствуются машины, тем труднее становится их дальнейшее усовершенствование; и, как показывает теория, есть предел такому усовершенствованию.

Значительно экономичнее тепловые двигатели (двигатели внутреннего сгорания), коэффициент полезного действия которых доходит до

---

[1]) У паровозов даже всего 6 — 8%; у малых машин — всего 2%. — *Сост.*
[2]) Их коэффициент полезного действия достигает 23%. — *Сост.*

35% и выше; они получили поэтому за последнее время громадное распространение и не только успешно борются, но даже и побеждают паровые машины.

Вплоть до самого последнего времени тепловые двигатели, несмотря на сравнительно высокую их отдачу, не применялись для движения больших судов, потому что не умели строить эти двигатели большой мощности [теперь же такие суда строятся и носят название «теплоходов»]. Иногда же применению теплового двигателя мешает отсутствие возможности найти на месте его установки или легко и дешево получать жидкое топливо, нефть или керосин. Например, локомобили, употребляющиеся для сельско-хозяйственных работ, все паровые, потому что их можно топить соломой, настолько более дешевой, чем нефть, что это оказывается выгоднее, несмотря на меньшую экономичность таких машин. С другой стороны, где требуются машины малой мощности и есть не особенно дорогое жидкое топливо, и в особенности где имеет главное значение вес и компактность машины и необходимого для нее запаса топлива, — там паровые машины с их тяжелыми и громоздкими паровыми котлами непригодны и уступают место тепловым двигателям (т.-е. двигателям внутреннего сгорания). В особенности это замечание касается автомобильных и аэропланных двигателей.

Н. Н. Андреев.

«Закон сохранения энергии», 1922.

Полезное действие паровой машины.

На основании принципа сохранения энергии, при каждом процессе, будь он естественный или технический, энергия не приобретается и не теряется, происходит только преобразование энергии из одной ее формы в другую. В нашем случае (в работе паровой машины) тепло обращается в механическую работу. Если измерить оба вида энергии в одних и тех же единицах, то получатся одинаковые числа. Но уже грубые измерения, произведенные на паровых машинах, показывают, что энергия, получаемая маховым колесом, составляет $1/6$ или $1/8$, у современных машин, может быть, $1/4$ той энергии, которую можно бы ожидать согласно принципу сохранения энергии. Естественно, что часть сообщенной машине энергии при прохождении ее через машину теряется благодаря трению, излучению, теплопроводности

и другими путями: вернее сказать, часть сообщенной энергии рассеивается в машине и в пространстве. Однако, легко показать, что эта «утечка» далеко не так велика, как полная потеря энергии; и теоретически с полной уверенностью можно доказать, что даже у машины, у которой совершенно исключены вышеупомянутые пр цессы, получаемая работа может составлять только небольшую часть сообщенной энергии. Можно даже совершенно точно сказать, как велика должна быть эта часть, иначе называемая полезным действием машины. Эта величина не зависит от устройства машины, а лишь от двух факторов: температуры котла, которым питается машина, и от температуры холодильника, пользование которым необходимо и который служит для отвода и конденсации пара (у локомотивов, например, конденсатором служит атмосфера).

Станем обе названные температуры отсчитывать не от точки замерзания воды, но от точки, которая лежит на 273 градуса Цельсия ниже нуля и носит название «абсолютного нуля» температуры. Во-вторых, будем в дальнейшем рассматривать не полезное действие машины, т.-е. отношение полученной энергии к энергии затраченной, а направим свое внимание на энергию теплой воды, отводимой в конденсатор, и будем называть степенью рассеяния машины отношение этой потерянной для машины энергии к первоначальной, имея в виду, что эта энергия, рассеиваемая в окружающее пространство, остается бесполезной для машины.

Численное значение степени рассеяния на основании установленных 70 лет тому назад и до сих пор незыблемых положений учения о теплоте (термодинамики) равно отношению абсолютных температур холодильника и котла. Совершенно ясно, что если мы знаем эту величину, то мы легко можем вычислить полезное действие машины, т.-е. ту величину, которая нас интересует: оно просто равно дополнению до единицы той правильной дроби, которая представляет степень рассеяния.

Чтобы получить наиболее экономно действующую машину, необходимо возможно увеличивать полезное действие, следовательно уменьшать степень рассеяния. Этого можно достигнуть двумя способами: или тем, что температуру котла (число, входящее в знаменатель), поддерживают возможно выше; или же возможно большим охлаждением холодильника (уменьшение знаменателя). Обе эти возможности, как легко понять, по крайней мере пока в машине употребляется вода

осуществимы лишь в узких пределах. Нормальная температура котла 100°, т.-е. 373° абсолютной шкалы температур; с другой стороны холодильник, в который устремляются сгущаемые пары, в лучшем случае имеет температуру в 50°, т.-е. 323° абсолютных; степень рассеяния, следовательно, равна $^{323}/_{373}$, т.-е. 86%, а значит для полезного действия остается только 14%. Существуют возможности несколько увеличить разницу обеих температур; можно, например, подвергнуть котел высокому давлению, отчего температура кипения повышается; однако, нельзя довести ее выше 150° Ц., или 423° абсолютных. Холодильник помощью особых приспособлений можно охладить до 20° Ц., т.-е. 292° абсолютных. Тогда степень рассеяния будет в круглых числах 70% и полезное действие 30%. Отсюда надо еще отнять потери, вызываемые побочными процессами (трение и т. д.), так что в лучшем случае остается 25%, т.-е. полезной оказывается только одна четверть всей применяемой энергии.

При употреблении некоторых других жидкостей можно получить лучшие результаты, но выгода не столь велика, а возникающие при этом неудобства слишком велики для того, чтобы открывать большое поле для технических усовершенствований.

Теперь становится ясным, почему так необыкновенно мало полезное действие тепловой и, главным образом, паровой машины: причина этого явления заключается в слишком малом промежутке между границами существования воды, т.-е. между точками таяния льда и кипения воды: на протяжении 273° вода тверда; с другой стороны, даже если считать вверх только до 1000° Ц., в пределах 627° вода парообразна, и только в маленьком промежутке в 100° вода находится в жидком состоянии. В связи с этим холодильник и котел по своим температурам очень близки; для использования всей энергии не хватает нужного тут резкого контраста. Этот контраст был бы налицо, живи мы на поверхности земли при более низких температурных условиях (предполагая, конечно, что наш организм был бы соответственно иначе устроен); если бы, например, точки кипения воды и таяния льда лежали при 125 и 500° абсолютной шкалы, то степень рассеяния равнялась бы $^{1}/_{4}$, а полезное действие было бы $^{3}/_{4}$, т.-е. 75%.

Ф. Ауэрбах.

«Семь аномалий воды». 1912.

Источники энергии в древности и в наше время.

Источниками энергии в древности были — сила воды, ветра и институт рабства.

На земле водяная сила заключает в себе громадные запасы мощности, но наиболее значительные из них географически распределены совершенно несоответственно экономическим потребностям населения. Широкое использование их стало возможным только в настоящее время, благодаря открытию электрической передачи силы, сообщившей перемещаемость водяным мощностям. В древности отсутствовали все условия, благоприятные их пользованию.

Водяные двигатели, в форме подливных колес, имели очень малое распространение; они ставились в реках или каналах, подводивших воду, приспособлялись к незначительным падениям воды. Устройство было несовершенно и применение к размолу зерна незначительно, в виду более дешевого и производительного труда животных и рабов. При подсчете источников энергии в древности мы оставим по этим причинам в стороне водяную силу.

Переходя к силе ветра, мы должны исключить ее применения на суше в форме ветряных двигателей. Ветряные мельницы были неизвестны ни древним азиатским народам, ни древним грекам и римлянам. Остатков старых мельниц не имеется на Востоке. Сила ветра находила себе применение в передвижении по большим водным поверхностям, в плавании по рекам и морям. Отметим прежде всего случайность этой силы и особенности древнего мореплавания. Оно происходило по преимуществу вдоль берегов и притом днем; на ночь судно вытаскивалось обыкновенно на берег. Эти обстоятельства требовали употребления весел и человеческого труда. Кроме купеческих трирем, имевших три ряда весел, гиганты древности, суда Гиерона Сиракузского с водоизмещением в 2700 тонн, имели по три мачты и по 20 ярусов весел. В виду исключительности применения силы ветра в далеко не обширной в то время отрасли народного хозяйства, мы также не введем ее в наш подсчет. Таким образом, фундаментом экономического прогресса древности является энергия рабов. Она и наиболее удовлетворяет тем условиям, которые должны выполняться источниками энергии.

Какую энергию может дать человек-машина?

Остановимся на человеке средней силы. Пища, им принимаемая в течение дня, развивает в теле от 3000 до 4000 больших калорий, что эквивалентно около полутора миллионам килограммометров. Свободный человек в 10-часовой рабочий день может произвести работу в 290000 килограммометров, что соответствует 8 килограммометрам в секунду, или мощности в $^1/_{10}$ лошадиной силы. Полезное действие или экономический коэффициент машины-человека представится отношением произведенной работы к потребленной энергии; оно равно 19%. Сравнительно с современным состоянием техники, это — в высокой степени совершенный двигатель: полезное действие в 19% является почти пределом для лучших паровых двигателей [1]). Древность и современность в этом отношении стоят одинаково. Наукой установленная норма для мертвой машины и свободного человека считается недостаточной для раба, и из него выколачивается повышение коэффициента полезного действия. Этим определяются и способы управления энергией в древности, ничего общего с наукой и современной техникой не имеющие. Энергия в древности не привлекала научного ума для изучения ее законов: она привлекала неистощимый арсенал насилий...

Рабство, как институт, постепенно чахло и, наконец, пало. Но что сделало возможным это падение, и не вернется ли когда-нибудь позорное учреждение на нашу землю? Ответы на эти вопросы может дать только современное развитие физических наук и их намечающееся будущее.

Оценим меркой древнего мира, меркой раба, результаты пользования современными нам источниками энергии, наукой подчиненными воле человека. (По сказанному выше, одна лошадиная сила соответствует 10 рабам.)

Я говорил о морских гигантах древности в 2700 тонн водоизмещения с 3 мачтами и 20 ярусами весел. Наибольшее современное нам (1912 г.) морское судно в $^1/_4$ версты длиною имеет 65000 тонн водоизмещения, машины в 70000 лошадиных сил, принимает 4100 пассажиров и обслуживается экипажем в 1100 человек. Если бы пар мы хотели заменить рабами, численность последних должна простираться до 700000 человек. Энергия рабов менее подат-

---

[1]) В двигателях внутреннего сгорания, нефтяных и бензиновых, коэффициент полезности значительно выше, чем в паровых, достигая почти до 40% (двигатель Дизеля).—*Сост.*

лива, чем энергия пара в преобразованиях сил и скоростей, и для перевода медленной работы рук человеческих в работу быстро вращающихся мореходных винтов нужно было бы устроить по меньшей мере 70 заводов по 10000 человек в каждом. Такой громадный механизм поглотит немалую долю энергии, и число рабов должно быть значительно увеличено. Чтобы держать в повиновении это население, нужен экипаж не в 1000 человек. Для заводов, тюрем, помещения населения со стражей и администрацией, магазинов для запасов пищи и т. д. нужен не корабль, а нечто такое, что по своей колоссальности не могло бы быть приведено в движение своим населением, если бы даже было построено. Мы можем вообще утверждать, что задачи современной техники неразрешимы без привлечения сил мертвой природы.

Как поступил бы современный инженер, если бы ему пришлось демонстрировать воскресшему мудрецу древности Маллетовский локомотив, развивающий до 3000 лошадиных сил, а временно и до 4000? Чтобы быть понятым, он скажет: вот машина, приводимая в движение 30000 рабов, несущихся с головокружительной скоростью экспресса.

Предложим далее вниманию мудреца проект электрической передачи мощности в 250000 лошадиных сил от водопадов реки Замбези на расстояние 1100 километров в мины Наталя и Трансвааля электрическим током в 150000 вольт напряжения. На чертежах проекта инженер укажет металлическую проволоку, по которой моментально на 1000 верст переносятся $2^1/_2$ миллиона рабов со всем запасом пищи, необходимым для их труда.

В этих рассказах мудрец усмотрит кощунство над истиной и воскликнет: это буйство мысли, перешедшей все пределы разумности и очевидности...

Еще несколько штрихов, характеризующих эту буйную мысль. Механическая энергия, потребляемая в настоящее время человечеством, соответствует мощности 225 миллионов лошадиных сил или $2^1/_4$ миллиардам рабов, трудящихся за совесть. Но население всего земного шара считает только $1^1/_2$ миллиарда людей. Обратив все это население в рабов, прекратив все другие виды деятельности, мы не получим той механической мощности, которая дается техникой, созданной современным физическим знанием.

Географы и историки, подсчитывающие население государств древности, включают в него и рабов. Будем же последовательны

и определим современное население не в $1^1/_2$, а в $3^3/_4$ миллиарда. Это совершенно точный подсчет с точки зрения техники, который в человеке усматривает только рабочую единицу. В течение миллионов веков природа довела население земли до $1^1/_2$ миллиардов, а буйный разум физических наук в полтора столетия создал человечеству почти вдвое большее число сотрудников...

Каким образом все это совершилось? Открытием в теплоте источника энергии. Но первые применения пара к получению механических мощностей около начала XVIII столетия дали только $^3/_{10}$% полезного действия [1], а в настоящее время в наиболее совершенных машинах этот коэффициент доходит до 18%. Успех повышения коэффициента преобразования тепловой энергии в механическую был обусловлен постепенным раскрытием свойств тепловой энергии, изучением управляющих ею законов... Эти знания, раскрывая природу тепловых процессов, дали возможность управлять ими сообразно этой природе и только этим путем извлекать из них наибольшую пользу.

Н. А. Умов [2]).

«Культурная роль физических наук», 1912.

---

[1]) Они превращали в механическую работу только $^1/_{300}$ долю потребляемой ими угольной энергии. Около 1770 г., до работ Джемса Уатта, этот коэффициент достиг 1%, а вскоре после того, как Уатт применил расширение пара и отделил цилиндр от конденсатора, достиг 3%. В 1860 г. этот коэффициент дошел до 6%, в 1900 г. до 15%, а в настоящее время до 16% и в особых случаях до 18% *(Умов)*.

[2]) Проф. Московского Университета Н. А. Умов — выдающийся физик-философ (скончался в 1915 г.).

VI. Природа теплоты.

Кинетическая теория газов.

Современный взгляд на внутреннее устройство газообразных тел заключается в следующем:

Мы допускаем, что в газообразных телах все частицы находятся в движении, но в движении не колебательном, а прямолинейном, поступательном. Всякая частица движется по прямой линии все дальше и дальше. В данном объеме газа различные частицы имеют всевозможные направления движения, так что газ должен представить нам картину какого-то весьма хаотического движения, которое для всякой частицы происходит и продолжается прямолинейно до тех пор, пока она не ударится о какую-нибудь преграду, например, о стенку сосуда, в котором заключается газ, или же о другую частицу, движущуюся по другому направлению. Вследствие такого столкновения, обе частицы меняют первоначальное направление движения. Такого рода столкновения, как показало дальнейшее развитие учения, должны происходить весьма и весьма часто, так что мы должны представить себе газообразное тело в виде хаоса, в котором частицы движутся прямолинейно, непрерывно, однако, сталкиваясь между собой и меняя вследствие этого направление движения. В таком представлении заключается основание так называемой «кинетической теории газов», замечательно хорошо объясняющей те явления, которые мы наблюдаем над газообразными телами. Она была основана, главным образом, Клаузиусом в пятидесятых годах XIX века.

Покажем, как эта теория объясняет главнейшие свойства газов. Всем известно, что основное свойство газа заключается в его стремлении расширяться. Если рядом с газообразным телом имеется пустота,

то часть газообразного тела немедленно устремляется в это пустое пространство; если газ находится в какой-либо оболочке, то результатом его стремления расшириться будет давление на все стенки облегающего и сдерживающего его тела, и если это тело — сосуд с отверстием, в котором помещен подвижной поршень, то газ произведет давление на этот поршень, и этот последний должен иметь известный вес, должен произвести соответственное давление на газ для того, чтобы последний его не поднял.

Прежде давление газа на стенки сосуда или на поршень, т.-е. стремление его расшириться, приписывали тому, что частицы газа взаимно отталкиваются. Теперь явление это объясняется гораздо проще.

В том хаосе, о котором было сказано ранее, частицы летят по всем направлениям и, ударяясь о поршень, отскакивают от него. Если допустить, что число частиц, ударяющихся таким образом о поршень, определяется биллионами и что скорость движения частиц весьма велика, то ясно, что хотя действие одного удара одной частицы ничтожно, однако, совокупность всех ударов о поршень, число которых, например, в одну секунду, громадно, может произвести весьма значительное давление на него. Итак, давление газа есть результат совокупности ударов летящих по прямой линии частиц. Что касается до стремления газа перейти немедленно в пустоту, то это явление не требует уже никакого объяснения: если сосуд с газом соединить с другим сосудом, пустым, то очевидно, что все частицы газа, которые в данный момент движутся по направлению к месту соединения двух сосудов, не встречая здесь препятствия, немедленно перелетят в пустое пространство другого сосуда, который таким образом наполнится весьма быстро.

Укажем еще на некоторые из всем известных свойств газообразных тел и покажем, как они объясняются на основании теории.

Когда газ, расширяясь, производит некоторую работу, он в то же время охлаждается. Это явление объясняется следующим образом: при высшей температуре газа частицы его движутся с большею скоростью; следовательно, уменьшение скорости движения частиц соответствует уменьшению температуры газа. Допустим, что газ, расширяясь, толкает поршень: в таком случае каждая частица газа, ударив о поршень, передает часть своего движения поршню и поэтому отскаки-

вает обратно уже с меньшею скоростью, чем та, которую она имела первоначально; следовательно, и температура газа должна понизиться. Если, наоборот, насильно, посредством поршня будем сжимать газ, то он будет нагреваться. Это объясняется очень просто: если движущиеся частицы газа будут встречать поршень, идущий им навстречу, то в момент удара о поршень они получат толчок и отскочат от поршня, находящегося в состоянии покоя; с увеличением скорости частиц должна увеличиться и температура газа.

Рассмотрим еще явление испарения жидкостей. Вообразим открытый сосуд, наполненный жидкостью, и положим, что над жидкостью находится воздух, который давит на ее поверхность сверху вниз. В таком случае происходит непрерывная бомбардировка поверхности жидкости частицами газообразного тела — воздуха. Частицы жидкости также находятся в движении; те частицы, которые находятся глубоко внутри самой жидкости, далеко отойти от своего первоначального места не могут. Легко, однако, понять, что если частицы жидкости, которые находятся у самой ее поверхности, в некоторый момент имеют большую скорость, двигаясь по направлению от жидкости прочь, то они могут отлететь, вырваться от остальной массы, так как они не с очень большою силою притягиваются назад. Но большинство этих частиц жидкости, стремящихся ускользнуть, весьма скоро встретят идущие им навстречу частицы газа, которые их оттолкнут обратно, так что в действительности лишь весьма немногим из частиц жидкости удастся проскользнуть между частицами газа. Но все-таки некоторым из частиц жидкости удастся отделиться от поверхности жидкости, и этим объясняется ее испарение. Чем выше будет температура жидкости, тем энергичнее будет движение ее частиц, тем с большею скоростью будут вылетать эти частицы, тем большие шансы будут они иметь не быть оттолкнутыми частицами воздуха. Поэтому испарение жидкости тем сильнее, чем выше ее температура. Наконец, когда число ударов частиц жидкости снизу вверх, т.-е. с поверхности жидкости, будет равняться числу ударов сверху вниз, тогда огромное число частиц жидкости будет испаряться. Еще некоторое повышение температуры жидкости — и давление снизу вверх будет больше давления сверху вниз; тогда последует обильное выделение частиц жидкости: она закипает.

В настоящее время учение о газах составляет стройное здание; множество явлений, например, теплопроводность, внутреннее трение,

и проч., исследованы путем математическим, и наука дошла до того, что в состоянии определить величину частиц газа и число их в данном объеме.

Проф. *О. Д. Хвольсон.*

«Популярные лекции об основных гипотезах физики», 1887.

Вычислим, с какою скоростью должны двигаться частицы воздуха, чтобы производить наблюдаемое давление. Предположим, что это будет обыкновенное атмосферное давление (1030 граммов на квадратный сантиметр). Так как *дина* составляет $^1/_{981}$ грамма, то имеем $1030 \times 981 = 1010000$ дин. Таково давление, производимое молекулами на каждой квадратный сантиметр поршня в цилиндре ABCD (черт. 18), если мы наполним его воздухом обычной плотности. Так как мы желаем вычислить скорость для определенной температуры, то примем, что она равна 0° Цельсия.

Чтобы упростить вычисление, не будем обращать внимание на взаимные удары молекул. Более глубокое обсуждение приводит к тому, что эти столкновения — если только частицы достаточно малы — действительно не оказывают никакого влияния на давление, производимое на стенки. На черт. 18 обозначена молекула P, которая летит к поршню и достигает его спустя некоторое время. Тогда он прибавит нечто к давлению, испытываемому поршнем. Но может также случиться, что эта частица, прежде чем дойдет до поршня, будет остановлена и отброшена другой частицей; так как она до поршня не долетает, то может на первый взгляд показаться, что давление вследствие этого уменьшится. Но если вспомним, что частица, двигавшаяся сверху и задержавшая молекулу P, сама будет отброшена к поршню вместо того, чтобы двигаться далее ко дну сосуда, то станет понятным, что это может уравновесить уменьшение давления.

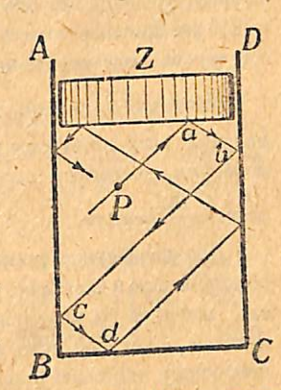


Рис. 18. Часть пути одной мелекулы газа, наполняющего цилиндр.

Второе упрощение касается формы сосуда. Мы выбираем куб, дно которого BC есть нижнее, а поршень Z — верхнее основание. Каждая частица собственно летает в обе стороны по линиям, подобным $Pabcd$; но мы примем (это тоже оправдывается при более глубоком рассмотрении), что движение частиц будет иметь тот же результат, как если бы одна треть всех молекул двигалась вперед и назад между BC и Z, другая треть — перпендикулярно к боковым поверхностям AB и CD, и последняя треть — спереди назад и обратно, между передней и задней стенкой. Наконец, величину ребра нашего куба мы будем считать в 1 сантиметр; мы в праве это сделать, так как можно наполнить воздухом при данной плотности сосуд произвольной величины. Тогда, как показывает взвешивание воздуха, во всем объеме мы будем иметь 0,001293 грамма, а масса молекул, производящих давление на поршень,

будет — согласно нашему предположению — равна $1/3$ этого числа, т.-е. 0,000431 г; для краткости мы напишем вместо этих чисел m и $\frac{m}{3}$.

Положим, что скорость молекулы v см в секунду: это наша неизвестная величина. В промежутке между двумя ударами о поршень молекула должна пройти путь в 2 см — 1 см вниз и затем 1 см вверх. Частица ударится о поршень столько раз, сколько раз этот путь содержится в пути, проходимом молекулой в 1 секунду, т.-е. в v сантиметрах; поэтому каждая частица встретит поршень $\frac{v}{2}$ раз.

Что же происходит при ударе? Представим себе, что поршень от каждого отдельного толчка приобретает некоторую скорость. Вычислим, как накопляются эти действия в течение 1 секунды, и перейдем от скорости, ежесекундно получаемой поршнем, к величине действующей на него силы. Движение, сообщаемое поршню, зависит, конечно, от его массы. Примем, для определенности, что эта масса в 1000 раз превышает массу $1/3$ содержащегося в сосуде газа, т.-е. той части, которую мы теперь рассматриваем.

Молекула ударяется о поршень $\frac{v}{2}$ раз, и это число одинаково для всех молекул, если одинаковы их скорости. Мы можем себе представить, что все эти молекулы достигают поршня одновременно — тогда каждый раз ударяющая масса$=\frac{m}{3}$граммам.

При ударе нужно различать два периода. В первом сила, развиваемая поршнем по отношению к частицам, уничтожает скорость. Сила, которая в состоянии сделать это, сообщила бы молекулам скорость v, если бы была надлежаще направлена. Сила же, с которой молекулы действуют на поршень, равна по величине противоположному действию поршня на молекулы. Итак, в продолжение первой части удара на поршень действует сила, могущая массе $\frac{m}{3}$ *г* сообщить скорость v. Массе поршня, которая в 1000 раз больше, эта сила сообщит скорость в 1000 раз меньшую, т.-е. 0,001 v.

В течение второй половины удара каждая молекула получает скорость v, с которой она удаляется от стенки; отсюда следует — применяя сейчас указанный принцип действия и противодействия], что поршню сообщается снова скорость 0,001 v. Складывая обе скорости, находим, что каждый толчок сообщает поршню скорость в 0,002 v; а так как ежесекундно сообщается поршню $\frac{v}{2}$ таких ударов, то скорость, которую газ в одну секунду сообщает поршню, выразится в сантиметрах следующим числом.

$$0{,}002\ v \times \frac{v}{2} = 0{,}001\ v^2$$

Чтобы найти соответствующую силу в динах, мы должны помножить это число на число граммов, содержащихся в массе поршня. Так как число граммов равно $1000 \times \frac{m}{3}$, то сила $p = 1000 \times \frac{m}{3} \times 0{,}0001\ v^2$, или

$$p = \frac{mv^2}{3} \text{ дин}$$

[Легко видеть, что этот результат не зависит от массы поршня.]

Найденное число представляет давление на 1 $см^2$ поверхности поршня. Но это давление, мы знаем, равно 1010000 дин. Следовательно,

$$\frac{mv^2}{3} = 1010000,$$

а так как $\frac{m}{3} = 0{,}000431$, то

$$v^2 = \frac{1010000}{0{,}000431} = 2340000000$$

Отсюда скорость $v = 48000$ *см* в секунду.

Г. А. Лоренц.

«Видимые и невидимые движения».

Скорость газовых молекул громадна. Молекула *кислорода* пролетает при 0° Ц. в 1 секунду путь в 461 метр. Более легкая молекула водорода или более легкий отдельный атом гелия движутся еще быстрее, а более тяжелые молекулы или их группы движутся медленнее. Наибольшею скоростью обладают молекулы водорода (если не считать еще большей скорости отдельных атомов водорода): она в 4 раза больше скорости молекул кислорода. Это дает при 0° Ц. скорость молекул водорода

1843 метра в секунду.

Та картина хаоса, каковым представляется нам внутренний строй газа, пополняется теперь важной деталью: триллионы частиц движутся по всевозможным направлениям с громадною скоростью, которая даже при 0° измеряется сотнями метров в секунду.

В следующей весьма поучительной табличке указаны скорости движения различных атомов, молекул и групп молекул при различных температурах, начиная от — 270° Ц. до 1000° Ц.

	— 270°	— 240°	— 150°	0°	100°	500°	1000°
Водород (2)	193,2	614	1237	1843	2153	3101	3980
Кислород (32)	48,3	154	309	461	539	775	995
Углекислый газ (44) . .	41,1	131	263,1	392	458	660	846,5
Пары ртути (200,6) . . .	19,3	61,4	123,7	184,3	215,3	310,1	398
Группа (20000)	1,93	6,14	12,4	18,4	21,5	31	39,8
Крупинка (2000000) . . .	0,19	0,61	0,12	1,84	2,15	3,1	4.

В первой строке даны температуры по Цельсию. В первом столбце сказано, о каких веществах идет речь, а именно, прежде всего водород, кислород, углекислый газ и пары ртути. В скобках поставлены молекулярные веса, при чем за единицу принят вес одного атома водорода. Предпоследняя строка относится к группе молекул, вес которой в 20000 раз больше веса атома водорода; наконец, последняя строка дает скорости теплового движения крупинки, вес которой в два миллиона раз превышает вес атома водорода. Все числа дают скорости движения, выраженные в метрах, пролетаемых в течение одной секунды.

Эту табличку следует рассмотреть весьма внимательно. Каждая горизонтальная строка показывает, как скорость поступательного движения атома (ртутных паров), молекул и групп возрастает с повышением температуры. При 1000° скорости приблизительно в 20 раз больше, чем при — 270°; последняя температура уже только на 3° превышает температуру абсолютного нуля [1]). Мы видим, что молекула водорода пролетает при 1000° в одну секунду 3980 метров; даже при — 270° скорость все еще равна 193,2 метра. Вертикальные столбцы показывают, как при данной температуре скорость уменьшается по мере увеличения массы движущейся частицы. Так, скорость молекулы кислорода в 4 раза, скорость атома ртути в 100 раз, крупинки в 1000 раз меньше скорости молекулы водорода. Атомы паров ртути обладают скоростями от 19,3 метра в секунду при — 270° до 398 метров при 1000°. Крупинка, которая в миллион раз тяжелее *молекулы* водорода, обладает при — 270° скоростью в 0,19 метра, т.-е. 19 сантиметров в секунду, и даже при 1000° ее скорость достигает только 4 метров в секунду. Крупинка, которая была бы еще в 100 раз тяжелее, двигалась бы в 10 раз медленнее и при — 270° проходила бы только 1,9 *см* в секунду.

При температуре в 4000° Ц. скорости приблизительно в два раза больше, чем при 1000°, так что молекула водорода пролетала бы около 8 километров в секунду. На *солнце*, где температура еще выше (на поверхности — до 6000° Ц.), скорости должны быть еще больше; они примерно в 4 раза превышают скорости, указанные в предпоследнем столбце и относящиеся к 500°.

---

[1]) См. след. статью «Абсолютный нуль температуры», стр. 131.

Обращаемся к любопытному вопросу о *столкновениях между частицами газа*, летающими с указанными, вообще весьма большими скоростями по всевозможным направлениям.

Если мысленно следить за движениями какой-либо одной молекулы и принять во внимание, что при каждом столкновении с другой молекулой меняется направление ее движения, то становится понятным, что это движение происходит по ломаной, т.-е. зигзагообразной линии [1]). Прямые части этих линий, т.-е. пути, пробегаемые от одного столкновения до следующего, очевидно, окажутся весьма неодинаковой длины, так как случайность должна здесь играть весьма большую роль. Иногда после столкновения молекула случайно очень скоро опять столкнется, так что пройденный прямолинейный путь окажется очень малым; но иногда, опять-таки случайно, новое столкновение произойдет не скоро, и путь будет иметь сравнительно значительную длину. Если, однако, взять огромное число таких путей, проходимых триллионами частиц, и вычислить их среднее значение, которое определит собою «среднюю длину пути», то эта величина будет вполне определенная, зависящая исключительно только от степени сжатия газа и от размеров молекул, т.-е. от рода газа. Легко понять, что средняя длина пути должна быть тем меньше, чем больше размеры частиц, ибо с увеличением этих размеров увеличивается вероятность их столкновения. Ясно также, что средняя длина пути должна быть тем меньше, чем больше газ сжат, т.-е. чем гуще распределены его частицы. И, действительно, вычисление показывает, что средняя длина пути обратно пропорциональна давлению, под которым находится рассматриваемый газ, или — что то же самое — его упругости. От температуры, т.-е. от скорости движения частиц, средняя длина пути не должна зависеть. Зато среднее *число столкновений*, претерпеваемое частицей

---

[1]) Классическая теория газов сравнивает молекулы с упругими шарами, которые испытывают беспрерывные толчки, так как размеры их не бесконечно малы. Согласно же современному представлению (в применении к теории газов еще, правда, недостаточно развитому) говорить о толчках не имеет смысла. По этому представлению молекулы должны быть уподоблены чрезвычайно малым планетным системам, составные части которых служат источниками электрических сил. Следовательно, между молекулами действуют электрические силы, которые постоянно отклоняют их от прямолинейных путей, притом тем сильнее, чем молекулы больше сближаются. (Поэтому путь движения молекулы должен быть зигзагообразным без острых углов.)
Проф. *Артур Хаав.*

в течение определенного времени, например, одной секунды, должно расти с увеличением скорости частицы, т.-е. с повышением температуры. Это ясно из того, что число столкновений должно равняться числу, показывающему, сколько раз средняя длина пути укладывается в том пути, который частица проходит в одну секунду, и который определяется скоростью частиц.

Клаузиус вычислил среднюю длину пути, проходимого газовыми молекулами от одного столкновения до следующего [1]), и нашел поразительный результат. Положим, что мы имеем газ в роде кислорода, азота или просто воздуха под обычным атмосферным давлением. Оказывается, что средняя длина пути в таком газе приблизительно равна

0,0001 миллиметра,

т.-е. одной десятитысячной доле миллиметра. Итак, в среднем частица пройдет лишь этот поразительно маленький путь от одного столкновения до следующего: этот путь меньше самой малой величины, которую можно разглядеть в наилучший микроскоп. Легко определить число столкновений, претерпеваемых частицей в течение одной секунды, если известна скорость движения частицы, т.-е. весь путь, который она пролетает в одну секунду и который, как мы видели, зависит от рода газа и от температуры, которую мы примем равной 0°. Табличка на стр. 125 показывает, что частица кислорода пролетает в одну секунду путь в 461 метр [2]); надо уменьшить это число до 425 метров, т.-е. взять

[1]) Путь, каким найдена была эта величина, понятен из следующих соображений: «Теплопроводность, благодаря которой происходит выравнивание температур неодинаково нагретых частей газа, весьма просто объясняется кинетической теорией. Молекулы более теплой части имеют в среднем большую скорость, чем молекулы холодной части. Поэтому через поверхность раздела обеих частей постоянно пролетают быстрые молекулы из теплой части в холодную и медленные — в обратном направлении. Вследствие этого температура теплой части убывает, а холодной возрастает, пока обе части не получат одинаковой температуры. Это убывание идет тем скорее, чем больше (независимо от скорости) средняя длина пути молекул, т.-е. чем *глубже* проникает теплая молекула в холодную часть газа. Отсюда и обратно: из наблюдений над теплопроводностью (а также и над внутренним трением) можно определить среднюю длину пути. При атмосферном давлении средняя длина пути молекулы кислорода равна 0,0000103 сантиметра» (*Л. Грец).*

[2]) Это та скорость, квадрат которой определяет *среднюю энергию* движения. От нее отличается *простая средняя скорость* частиц, которая на 8% меньше и, например, для кислорода при 0° равна 425 метрам.

среднюю скорость. Ясно, что частица на этом пути столкнется столько раз, сколько раз одна десятитысячная доля миллиметра содержится в 425 метрах. Это дает при 0°

4250 миллионов столкновений в секунду.

Если мы сдавим газ так, что его объем сделается в 500 раз меньше, чем при обычном атмосферном давлении, то число столкновений увеличивается еще в 500 раз; если, кроме того, довести температуру до 1000°, то это число увеличится еще в два раза и сделается равным 4000000000000 столкновений в секунду. Средняя длина пути увеличивается, и число столкновений уменьшается, если мы перейдем, во-первых, к высокой степени разрежения и, во-вторых, к низким температурам. Современные воздушные насосы дают возможность разредить газ до одной 1000000000-й доли атмосферы, а при умелом обращении даже до еще почти в 100 раз меньшего давления. При первом из этих давлений мы имеем при 0° [для кислорода] до 4 столкновений в секунду, а при — 270° одно столкновение в $2^1/_2$ секунды. При последнем, крайнем разрежении столкновение частиц делается редким явлением и при — 270° частица сталкивается примерно один раз в 4 минуты, а средняя длина пути измеряется километрами. Частицы летят почти от стенки к стенке того сосуда, в котором находится столь сильно разреженный газ.

Проф. *О. Д. Хвольсон.*

«Физика и ее значение для человечества», 1923.

Упражнение. Сколько молекул в 1 $см^3$ газа, разреженного до той степени, о которой говорится в последних строках этой статьи? — Каково их взаимное среднее расстояние? — *Сост.*

Как велик радиус молекулы, если представлять себе ее шарообразной? Весь объем, который действительно занимают молекулы одного кубического сантиметра, приблизительно одинаков с объемом, заполняемым теми же молекулами, когда под действием давления или охлаждения газ превращается в жидкость или даже в твердое тело, так как при этом можно считать, что молекулы располагаются бок-о-бок возможно теснее. Плотность вещества в жидком или твердом состоянии оказывается поэтому несравненно большею, чем в газообразном. Так, например, газообразный кислород имеет при атмосферном давле-

нии плотность 0,00143, тогда как наблюдавшаяся плотность жидкого кислорода = 1,249; отношение объема плотно сомкнутых молекул к объему тех же молекул в газообразном состоянии (при атмосферном давлении) для кислорода равно

$$\frac{0,00143}{1,249} = 0,0011$$

Это число носит название коэффициента конденсации. Если принять во внимание, что при плотном расположении молекул центр каждой молекулы надо сместить на длину ее радиуса, чтобы он встретил ближайшую молекулу, в то время, как в газе его надо для встречи передвинуть на среднюю длину пути, то можно и без точных вычислений видеть, что коэффициент конденсации равен приблизительно отношению радиуса молекулы к средней длине пути. Следовательно, радиус молекулы можно получить из средней длины пути и из коэффициента конденсации. Так, в случае кислорода, средняя длина пути которого — 0,0000103 *см*, радиус молекулы должен равняться приблизительно

$$0,0011 \times 0,0000103 = 0,0000000113 \text{ см.}$$

Таким образом, на основании более точных вычислений, найдены были следующие значения для радиусов молекул:

водород	1
гелий	0,85
азот	1,35
кислород	1,30
аргон	1,35
хлор	2
ртуть	1,40
эфир	3

стомиллионных долей сантиметра [1]).

Конечно, эти числа — лишь приближенные значения[2]). Мы получили лишь точку опоры для суждения о действительной величине

[1]) В масштабе 1 *мм* в 10 километрах (т.-е. при увеличении в десять миллионов раз) радиус атома имел бы величину около 1 миллиметра. — *Сост.*

[2]) Так как молекулы, вероятно, не шарообразны и, кроме того, в жидком состоянии не прилегают друг к другу вплотную, как мы допускали. — *Сост.*

атомов, — точнее о порядке их величины. Радиус атома [1]) имеет величину порядка одной десятимиллионной части миллиметра (если считать атомы шарообразными).

Зная величину молекулы, не трудно определить и число молекул в одном кубическом сантиметре. (Это число называется Лошмидтовым числом, так как Лошмидт впервые указал путь к его определению). Действительно, в среднем каждая молекула пролетает среднюю длину пути, прежде чем встретит другую молекулу; значит, цилиндрическое пространство, проходимое молекулой при этом полете, содержит, в среднем, только одну молекулу. Поэтому отношение объема 1 $см^3$ к объему этого цилиндра равно числу молекул в 1 кубическом сантиметре. Вычисление показывает, что в 1 $см^3$ газа при атмосферном давлении содержится 27,2 триллиона молекул (называя триллионом миллион миллионов миллионов). Это Лошмидтово число для всех газов одинаково, так как (согласно принципу Авогадро) все газы содержат в 1 $см^3$ при одинаковых давлении и температуре одно и то же число молекул.

Если представим себе, что молекулы распределены равномерно в кубическом сантиметре, т.-е. на каждую молекулу придется маленький кубик с объемом в $\frac{1}{27,2 \text{ триллиона}}$ $см^3$. Ребро этого кубика равно поэтому в круглых числах $\frac{1}{3.000.000}$ *см*, или 0,00000033 *см*, т.-е. 3 — 4 миллионным миллиметра. Такова величина среднего расстояния между двумя молекулами. Мы видим, что расстояние между двумя ближайшими молекулами в среднем в 30 — 40 раз больше их радиуса.

Проф. *Л. Грец.*
«Теория атома», *1920.*

Упражнение. Вычислите массу одной молекулы водорода. — *Сост.*

Абсолютный нуль температуры.

Если теплота есть кинетическая энергия молекул, то, очевидно, что должен существовать некоторый предел, — температура, ниже которой нельзя охладить тело, хотя существование верхнего

[1]) Молекулы гелия, аргона, ртути состоят из одного атома, и полученные для них размеры молекулы есть размеры их атома. — *Сост.*

предела температуры, выше которой нельзя нагреть тела, не представляется необходимым. Вещество, которое состоит из совершенно неподвижных молекул, является абсолютно холодным; ничего более холодного мы не можем себе представить. Истинным нулем всякой термометрической шкалы является этот абсолютный нуль, а не точка замерзания воды или какого-либо другого вещества.

Два тела имеют температуры, равные температуре какого-нибудь газа, следовательно, одинаковую температуру, тогда, когда тепловой обмен между каждым из них и этим газом не вызывает изменения кинетической энергии молекул газа, т.-е. изменения давления, если газ имеет постоянный объем, и изменения объема — при постоянном давлении. Из двух температур вдвое больше та, при которой кинетическая энергия молекул газа, или его давление при постоянном объеме, тоже вдвое больше. Если мы примем шкалу Цельсия, то оказывается, что давление в газовом термометре с постоянным объемом возрастает при повышении температуры на 1° на $^1/_{273}$ давления газа при 0° и уменьшается на ту же величину на каждый 1° ниже нуля.

Отсюда следует, что при температуре 273° давление газа удваивается, при 546° утраивается, при 819° учетверяется и т. д.

Наоборот, давление уменьшится вдвое при — 136,5°; при — 273° давление и кинетическая энергия молекул газа совершенно уничтожаются, если только он не перейдет в жидкость, как это случается со всеми известными газами еще прежде, чем они достигнут этой температуры. Молекулы делаются абсолютно неподвижными и, следовательно, абсолютно холодными. Иными словами, абсолютный нуль — 273° ниже нуля Цельсиевой шкалы. «Абсолютная температура», как ее называют, получается прибавлением 273° к температуре, выраженной в градусах Цельсия.

Фр. Содди.

«Материя и энергия», *1911*.

Закон Бойля-Мариотта и отступления от него.

Представим себе, что мы уменьшили объем, занимаемый газом, — сжали газ. Мы можем вообразить себе, что стенки кубического ящика (содержащего газ) могут сдвигаться и раздвигаться на любое расстояние; пусть мы медленно [1]) сдвинули их так, что каждый из трех размеров ящика (длина, ширина, вышина) стал *вдвое* меньше, чем прежде. Объем ящика уменьшится от этого в *восемь* раз. Посмотрим, что станется с давлением газа на 1 квадратный сантиметр какой-нибудь стенки.

Ясно, что частицы *сблизились* между собою *вдвое*, т.-е. средняя величина расстояния между двумя ближайшими частицами уменьшилась наполовину. Расстояние крайних частиц от [противоположных] стенок средним числом стало также вдвое меньше. Отсюда два следствия.

Во-первых, число частиц, ударяющихся в каждый квадратный сантиметр стенки, сделалось *вчетверо больше* прежнего (то же число ударяющихся частиц сосредоточено теперь на площади вчетверо меньшей) [2]).

Далее, столкновения частиц между собою и со стенками ящика будут случаться *вдвое чаще;* каждая частица в данное время (например, в 1 секунду) будет претерпевать двойное против прежнего число толчков и двойное число ударов о стенку.

Отсюда не трудно понять, что произойдет с давлением газа при новых условиях. С одной стороны, число частиц, ударяющихся в одну секунду в данную площадь, сделалось *вчетверо* больше; с другой стороны, удары каждой отдельной частицы повторяются *вдвое* чаще. Давление, т.-е. сумма толчков на данную площадь в 1 секунду, увеличится в *восемь* раз. *Оно возросло в таком же отношении, в каком уменьшился объем газа.* Мы произвольно взяли число 8; при всяком ином сжатии вывод остался бы верен.

Но это — знакомый нам *закон Бойля;* мы видим, что он весьма просто вытекает из нашей гипотезы (кинетической теории газов).

Рассуждая о том, как должно измениться давление, когда изменим объем газа, мы делали два допущения, которые не могут быть вполне справедливы. Мы, во-первых, считали частицы газа как бы *точками*, вовсе не имеющими размеров. На самом деле это — *тела*, хотя и малые. Только считая их за точки, мы были вправе сказать, что при восьмикратном уменьшении объема расстояние двух частиц уменьшилось вдвое, при 1.000-кратном — вдесятеро. Если бы это было

[1]) При *быстром* сжатии температура газа поднялась бы; мы же желаем изменить объем газа при неизменной температуре. — *Сост.*

[2]) При уменьшении *линейных* размеров куба *вдвое* его поверхность уменьшилась *вчетверо*. — *Сост.*

вполне верно, мы могли сжимать газ сколько угодно, все-таки среднее расстояние между двумя ближайшими частицами не дошло бы до нуля. Но как скоро частицы газа суть *тела*, мы можем представить их себе сдвинутыми до того, что они касаются друг друга и далее сдвигаться не могут, по непроницаемости.

Итак, на самом деле расстояние двух частиц обращается в нуль не при бесконечно большом сжатии газа, а ранее. Отсюда ясно, что это расстояние уменьшается быстрее, чем мы предполагали: при восьмикратном сжатии оно будет *меньше*, чем половина прежнего, при 1.000-кратном меньше, чем $^1/_{10}$.

Но от расстояния двух частиц зависит, как мы видели, число ударов о стенку, т.-е. давление. Если расстояние частиц убывает быстрее, чем мы думали, то быстрее же будет расти давление при сжатии. Т.-е. газ при сжатии должен обнаруживать давления более тех, какие бы следовали по закону Бойля. Это подтверждается опытом для *водорода* при умеренных давлениях (1 — 30 атмосфер) и для *всех газов* при давлениях весьма больших.

Но есть и другая причина *уклонения*, которой мы еще не принимали в расчет; она должна вести к противоположным следствиям.

Мы допускали, что между частицами газа нет ни притяжений, ни отталкиваний, что они действуют друг на друга только в момент столкновения, но не действуют издали. Но весьма естественно, что то притяжение, какое оказывается между частицами в жидком или твердом теле, действует и в газе, хотя сильно ослабленное дальностью частиц. Этого мы не имели в виду. Ясно, что такое притяжение будет увеличивать плотность газа. Не будь этого притяжения, плотность возрастала бы пропорционально давлению; теперь она будет возрастать быстрее. Это значит, наш газ будет обнаруживать такое отступление от Бойлева закона, какое мы находим для воздуха и большинства газов при умеренных давлениях [1]).

Итак, наша гипотеза (кинетическая теория газов) прямо указывает на те отступления от газовых законов, какие мы видим на опыте.

---

[1]) «Возьмем, например, атмосферный воздух. Если бы он точно подчинялся
закону Бойля-Мариотта, то для того, чтобы уменьшить его объем в 100 раз, нужно
было бы увеличить давление в 100 раз, т.-е. сделать его равным 100 атмосферам;
а чтобы уменьшить его объем в 300 раз, надо было бы приложить давление в 300 атмо-
сфер. Опыт показывает, однако, что для уменьшения объема в 100 раз достаточно
97 атмосфер вместо 100, но что для уменьшения объема в 300 раз мало 300 атмосфер,
а нужно 330 атмосфер. А чтобы уменьшить объем воздуха в 700 раз (т.-е. довести почти до плотности воды) — нужно не 700 атмосфер, а 3.000!

«То, что атмосферный воздух оказывается при объеме в 100 раз меньшем лучше сжимаемым, чем следовало бы по закону Бойля-Мариотта, показывает, что между частицами действуют хоть слабые, но притягательные силы. А то обстоятельство, что при еще меньших объемах сжимаемость воздуха хуже, чем следовало бы по закону Бойля-Мариотта, указывает, что размеры частиц не очень уж малы сравнительно с их взаимными расстояниями».

(Проф. *Б. П. Вейнберг*). — *Сост.*

«Идеальным газом» мог бы быть только такой, частицы которого суть точки и не оказывают никаких взаимодействий на расстоянии. Несоблюдение этих двух условий ведет к уклонениям то в ту, то в другую сторону от закона Бойля, смотря по тому, какая из двух причин преобладает. Для *водорода*, например, мы имеем право предположить, что влияние *размера* частиц сильнее, чем влияние частичного *притяжения*.

Руководясь этими соображениями, голландский физик фан-дер-Ваальс предложил для газов новый закон зависимости между давлением, объемом и температурой. Это — закон Бойля и Шарля (Мариотта — Гей-Люссака), усложненный двумя поправками: одна зависит от размера частиц, другая — от силы их притяжения [1]). Оказалось, что этот новый закон объясняет весьма точно всю сложность явлений, если только припишем частицам газа известный объем и известную силу сцепления. Наоборот, опытные данные относительно того или другого газа, при попытке подвести их под закон фан-дер-Ваальса, дают нам возможность узнать, какова величина частиц газа, и каково их взаимное притяжение.

Таким образом, эти неправильности газов, эти уклонения от «идеала» приобретают особенную цену: они дают нам средство решить самые недоступные, повидимому, вопросы из мира атомов.

А. Г. Столетов.

«Очерк развития наших сведений о газах», 1879.

---

[1]) Закон Бойля и Шарля (Мариотта — Г. Люссака), выраженный математически, имеет вид: $pv = cT$, где p—давление, v—объем, T—абсолютная температура газа, c — некоторый постоянный коэффициент, особый для каждого газа. Закон Ваальса следующий: $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = cT$, где a, b, c, — три коэффициента, характеризующие газ; из них a зависит от силы частичного притяжения, b — от суммы объемов частиц. — *А. С.*

Критическая температура.

I.

Из атомической теории логически вытекает заключение, что различные физические состояния какого-либо тела, т.-е. состояние твердое, жидкое или газообразное, обусловливаются исключительно характером движения молекул этого тела, и что то, что в состоянии ослабить интенсивность этого движения, может вызвать переход тела из газообразного состояния в жидкое, из жидкого состояния в твердое. Нам хорошо известно, что понижение температуры, сопровождающееся уменьшением скорости движения молекул и вместе с тем сближением этих молекул и увеличением притяжения между ними, вызывает ожижение паров и газов, а затем и отвердевание жидкостей. Но является возможность сделать заключение, что *без охлаждения* одно простое сжатие газа, т.-е. сближение его молекул, а следовательно увеличение взаимного притяжения этих молекул, может вызвать относительное закрепление этих молекул в определенные группы, может вызвать ожижение этого газа. Такое заключение, однако, может оказаться не всегда верным. В самом деле: молекулы газа при той температуре, которую имеет этот газ, могут обладать такою скоростью, что, как бы ни было велико сближение этих молекул друг к другу, они, несмотря на увеличившееся взаимное притяжение, останутся сравнительно свободными и не будут закреплены в группы, как нужно это допустить в жидкости, которая может сохраняться в открытом сосуде.

И действительно, опыты показали, что всякому газу соответствует температура, при которой, а тем более выше которой этот газ никаким давлением, ни при каком сжатии не может быть обращен в жидкость. Такая температура названа *«критическою температурою»*. Отличительная особенность такой температуры в теле была впервые указана Д. И. Менделеевым в 1860 г., а затем еще более обстоятельно вопрос о критическом состоянии вещества, т.-е. о состоянии, при котором вещество, несмотря на какое бы то ни было давление на него, может быть только газообразным, был обследован английским ученым Эндрюсом.

Критические температуры различных веществ чрезвычайно различны. У воды критическая температура 364°, у чистого алкоголя

242°, у угольной кислоты 31°, у кислорода она — 118°, у азота — 146°, у водорода — 234°, у гелия — 268 [1]).

Мы видим, как низки критические температуры у кислорода, водорода и гелия. Поэтому-то многочисленные попытки обратить в жидкость воздух и его составные части, кислород и азот, делавшиеся в прошлом столетии вплоть до работ Кальете и Пикте (1877 г.), не увенчивались успехом. Во всех этих прежних опытах сжимавшиеся газы не были достаточно охлаждены. Только Кальете и — независимо от него — Пикте удалось охладить сжатый кислород до температуры меньшей, чем — 118°, и только тогда кислород получился ожиженным. Жидкий водород впервые был получен в 1898 г. Дьюаром, а жидкий гелий — в 1908 г. Каммерлинг-Оннесом [2]). Температура жидкого воздуха в открытом сосуде около — 190° Ц.

И. И. Боргман.

«Атомическая теория строения тел», 1914.

II.

Что же, в сущности, это за состояние, которое мы называем критическим, чем оно вызывается и обусловлено? Ответ на этот вопрос получится, если мы примем во внимание влияние температуры на физические свойства жидких тел. Именно, это влияние таково, что при критической температуре *поверхностное натяжение* обращается в нуль, *скрытая теплота парообразования* тоже становится нулем, а два объема, которые может иметь вещество при всякой данной температуре и данном давлении (объем вещества в жидком состоянии и объем его в состоянии газа), *становятся одинаковыми*. Отсюда заключаем, что при критической температуре молекулярные скорости настолько велики, что молекулярные силы *не в состоянии удержать молекулы в таком их расположении, какое соответствует жидкому состоянию;* в этом и лежит значение критической температуры. И как бы мы ни увеличивали давление, иными словами, как бы мы ни сближали молекулы между собой, раз температура выше критической, движение молекул

---

[1]) Температуры исправлены согласно позднейшим данным. — *Сост.*

[2]) В городе Лейдене, в Голландии. В самое последнее время, охлаждая жидкий гелий, Каммерлинг-Оннес достиг температуры в —272,1°; это наиболее низкая из достигнутых пока низких температур. — *Сост.*

всегда оказывается столь быстрым (ведь скорость молекул обусловлена *только* температурой и от давления не зависит), что молекулярные силы остаются до известной степени как бы не существующими. Мы говорим *до известной степени;* это потому, что *совсем* они не исчезают: ведь и в газах они есть. Но эти молекулярные силы изменяются так, что нет поверхностного натяжения. Раз же на поверхности тела нет натяжения, не нужно и работы на преодоление этого натяжения, а эта работа как раз и проявляется в так называемой скрытой теплоте испарения.

Проф. *Д. А. Гольдгаммер.*

«Курс физики», 1917.

Сжижение газов.

Если бы мы стали понижать температуру нашего помещения [1]), то мы заставили бы все газы, входящие в состав этого воздуха, превратиться в жидкости. Первые признаки сжижения обнаружил бы водяной пар, вероятно, около 10°Ц. (это зависит от степени его близости к состоянию насыщения), сначала в виде росы на более холодных предметах, а затем при равномерном охлаждении всего воздуха в виде тумана, который стал бы затем при быстром понижении температуры падать в виде дождя. Воды набралось бы из этого помещения до 10 ведер, которая и замерзла бы при 0°; при дальнейшем и быстром опускании температуры ниже 0° мы увидели бы появление снега; при — 50° почти весь водяной газ выпал бы из воздуха; его осталось бы только $^1/_{300}$ часть первоначального количества. При — 150°Ц., в виду очень малого количества углекислоты в воздухе, она появилась бы прямо в твердом виде, в виде такого же снега, как и водяной пар. При — 190°Ц. почти одновременно начали бы превращаться в жидкость две главные составные части воздуха: кислород и азот. При — 200°Ц. их набралось бы уже около 900 ведер, при чем воздуха осталось бы всего $^1/_8$ часть. Наконец, при — 271,5, самой низкой достигнутой в настоящее время температуре [2]), оба газа лежали бы здесь на полу в виде снега; в самом же помещении остались бы едва уловимые следы водяного газа и углекислоты, очень мало кислорода и азота.

[1]) Т.-е. большой классной комнаты. — *Сост.*

[2]) Теперь достигнута температура ниже — 272°Ц. — *Сост.*

Однако, как же мы стали бы поступать, если бы захотели охладить это помещение и получить всю эту картину сжижения газов? Ведь у нас нет таких холодных тел, которые могли бы дать понижение температуры, не говоря уже о — 271,5°Ц., но даже и — 30°Ц. Как же производится в действительности сжижение газов?

Оказывается, что для этого есть единственный очень простой способ. Вспомним, что температура кипения жидкостей, а следовательно, и температура обратного превращения газов в жидкости (они совпадают между собою) увеличивается с давлением. Это явление, неудобное для превращения жидкостей в газы, так как оно требует более сильного нагревания, а потому задерживает это превращение, чрезвычайно удобно для обратного перехода, если этот переход происходит при температуре ниже обыкновенной. Ведь в этом последнем случае повышение температуры сжижения с давлением приближает эту температуру к нашей обыкновенной температуре, т.-е. требует менее сильного охлаждения. Например, под давлением в 4 атмосферы углекислый газ превращается в жидкость при температуре в — 60°Ц.; под давлением в 20 атмосфер он превращается уже при — 20°Ц., а под давлением в 34 атмосферы для этой же цели требуется понизить температуру его всего только до 0°? Значит довести давление в углекислом газе, имеющем температуру 0°, до 34 атм., или, попросту говоря, сжать этот газ, собранный в каком-нибудь крепком сосуде под обыкновенным давлением, так, чтобы объем его уменьшился в 34 раза, и мы увидим, как он при дальнейшем уменьшении объема начнет переходить в жидкость.

Нужно заметить, однако, что во все время этого перехода потребуется отнимать от него теплоту подобно тому, как при обращении жидкостей в газ требуется сообщать им теплоту. Например, при обращении углекислоты в жидкость при 0° на каждый грамм полученной жидкости приходится отнимать по 65 калорий. Это есть *теплота парообразования* при 0°. С другой стороны, такое отнятие теплоты для нас и выгодно, потому что мы таким образом, отнимая от нее теплоту, как бы закрепляем ее в форме жидкости. В самом деле, для того, чтобы она могла снова перейти в газообразное состояние, мы должны были бы ей снова сообщить то же количество теплоты, которое от нее отняли; но если мы этого не сделаем, то откуда она его возьмет?

Освободим теперь жидкую углекислоту от давления, открывши сосуд, в котором она находится: тогда, оказавшись под давлением

воздуха, она закипит и начнет переходить в газообразное состояние, но, не получая ниоткуда необходимой теплоты, она станет расходовать свою собственную и *будет охлаждаться*, пока, наконец, оставшаяся часть ее не превратится в твердое состояние, имеющее вид снега и температуру — 80°Ц. *Вот это последнее явление и есть самый естественный путь для получения низких температур.* Ниже температуры — 80°Ц. углекислота не станет охлаждаться, так как при этой температуре наибольшее давление ее газа равняется атмосферному давлению; при более же низкой температуре оно становится ниже, вследствие чего кипение является невозможным.

Под большим давлением можно получить жидкую углекислоту при температуре выше 0°. Так под давлением в 52 атмосферы она сжижается при 15° Ц.

Нельзя ли попробовать то же и с воздухом? К сожалению, нет. Такие попытки делались в течение долгих лет, применялись давления, доходившие до 800 атм., но все труды пропали даром. Горький опыт показал, что сжижение газа при помощи давления может быть успешно произведено только тогда, если температура его имеет величину ниже некоторого предела, определяемого его природой. Таким образом, та же самая углекислота не дает никаких признаков сжижения, если она нагрета выше 31° Ц. Для воздуха эта предельная температура равна — 140° Ц.

Вот таблица этих предельных, или критических температур для наиболее известных тел:

Вещества	Критическая температура
Гелий	— 264°
Водород	— 242°
Азот	— 146°
Воздух	— 140°
Кислород	— 118°
Углекислота	+ 31°
Аммиак	+ 130°
Хлор	+ 148°
Сернистая кислота	+ 156°
Вода	+ 365°

Как видно из этой таблицы, и вода не представляет исключения из общего закона: выше 365° водяной пар никакими средствами нельзя

превратить в жидкость; или, наоборот, нагревши воду до 365° Ц., нельзя никакими средствами удержать ее в жидком виде.

Для того, чтобы получить воздух в жидком виде, нужно было бы охладить его ниже — 140° Ц. Это можно было бы сделать при помощи жидкой углекислоты, заставляя ее кипеть в очень разреженном пространстве. Но в настоящее время открыт более прямой способ, позволяющий обходиться для получения жидкого воздуха без помощи каких-либо других газов. Его можно назвать способом *последовательного самоохлаждения.* Он заключается в следующем. Воздух, сжимаемый при помощи насоса до 200 атмосфер, заставляют переходить через очень длинный змеевик, представляющий собою трубку, свернутую в виде большого числа витков, внизу которой находится тонкое отверстие, закрываемое более или менее при помощи стержня с винтовой нарезкой. Змеевик окружен длинным стеклянным стаканом, с двойными стенками, из промежутка между которыми выкачан воздух, чтобы остановить проникновение тепла из окружающего пространства внутрь прибора чрез *теплопроводность* воздуха. Кроме того, чтобы устранить нагревание прибора *лучами*, исходящими от окружающих тел, стеклянный сосуд покрывают внутри блестящим слоем ртути, который отражает эти лучи. Действие прибора таково. В воздухе, как и во всех других газах, наблюдаются, хотя и очень слабые, *следы притяжения между частицами.* Поэтому, когда он, выходя из змеевика, где он сжат в 200 раз существующим там давлением, рассеивается в наружном пространстве, частицам его приходится производить некоторую работу на преодолевание существующего между ними притяжения, подобно тому, как и при превращении жидкости в газ. Вследствие этого ему приходится затрачивать часть своей теплоты на эту работу, и он охлаждается приблизительно на 45° при выходе из отверстия змеевика. Этот охлажденный воздух вследствие того, что змеевик окружен стаканом, направляется кверху и, проходя *между* витками змеевика, в свою очередь, *охлаждает его.* Таким образом следующие части воздуха, проходящие внутри змеевика, охлаждаются уже от соприкосновения с его стенками. Вырываясь же из отверстия, они охлаждаются еще более и, возвращаясь между витками змеевика, они, в свою очередь, еще более понижают его температуру. Итак, змеевик, а вместе с ним и проходящий через него воздух охлаждаются все более и более, пока, наконец, не достигнут температуры — 190° Ц., когда выходящий из отверстия воздух *превращается уже частью в жид-*

кость и падает на дно стакана в виде капель. (Устроенная на этом принципе машина для сжижения газов носит, по имени изобретателя, название «машины Линде».)

Водород, газ, еще труднее сжижаемый, можно получить в жидком виде с помощью того же прибора, в котором получается и жидкий воздух. Но здесь, в виду особых условий, представляемых водородом, нельзя обойтись без постороннего охлаждения. Для этой цели средняя часть змеевика окружается коробкой, в которую наливается предварительно полученный жидкий воздух. Жидкий водород, получаемый из прибора, имеет температуру — 253° Ц. Он в 14 раз менее плотен, чем вода [1]). Заставляя его кипеть при малом давлении, можно понизить температуру до — 265° Ц. В настоящее время таким же образом превращен в жидкость (и даже заморожен) последний из газов, до сих пор не поддававшийся этому превращению, — именно, гелий. Критическая температура гелия равна — 264°. (Кипением сжиженного *гелия* под ослабленным давлением достигнута температура около — 272, при которой сжиженный гелий затвердевал).

В заключение остается ответить на последний вопрос: можно ли дальше производить охлаждение?

Можно, но все с бо́льшим трудом. Дело заключается в том, что единственный возможный для нас путь получения низких температур заключается, подобно вышеописанному, в том, что мы отнимаем теплоту и переносим ее от охлаждаемого тела к окружающим телам *при помощи механической работы.* Например, в машине жидкого воздуха эта работа тратится на приведение в действие насоса, который сжимает воздух до 200 атмосфер и прогоняет его чрез змеевик. Другого пути у нас нет. Но наука, изучающая явления теплоты с механической точки зрения, т.-е. термодинамика, доказывает, что производительность такого способа уменьшается *по мере понижения температуры охлаждаемого тела,* при чем это уменьшение идет быстрыми шагами по мере приближения к температуре — 273° Ц. и *достигает при этой температуре нуля,* т.-е. при температуре — 273° Ц.; какие бы работы мы ни прилагали и какие бы машины для охлаждения ни строили, мы не были бы в состоянии перенести ни малейшей доли теплоты от охлаждаемого тела в окружающее пространство. Приближаясь же к этой

[1]) Это, следовательно, самая легкая из всех известных нам жидкостей; она легче воды во столько же раз, во сколько раз вода легче ртути. — *Сост.*

температуре, мы увидели бы, что на отнятие от тела ничтожных количеств теплоты нам приходилось бы затрачивать громадные количества работы.

Температура — 273° Ц., ниже которой мы не имеем возможности охлаждать тела, называется *абсолютным нулем.* Как вы видите, эта температура лежит очень недалеко от достигнутых уже температур, но этот промежуток кажется так мал только потому, что мы применяем к нему нашу искусственную мерку в виде градусов ртутного термометра. Если же пройденные промежутки температуры мы будем измерять *той работой, которую нужно затратить для их прохождения,* то вам станет ясно, что абсолютный нуль лежит от нас еще бесконечно далеко. Иными словами, мы его никогда не достигнем!

Проф. *Б. Розинг.*

«Теплота», 1924.

Дюаров сосуд.

Сжижение воздуха в атмосфере обыкновенной лаборатории есть такой же подвиг, как получение жидкой воды из пара, нагретого до температуры белого каления, при условии, что служащие для того приборы и все окружающие предметы нагреты до той же высокой температуры. Главная трудность — не столько в том, чтобы произвести сильный холод, сколько в том, чтобы раз полученный холод сохранить в перегретой среде. Обыкновенные непроводники неприменимы вследствие их громоздкости и непрозрачности, а при опытах с жидким воздухом существенно важно, чтобы продукты сжижения были видимы и чтобы с ними легко было обращаться.

Размышляя над этими затруднениями в 1892 г., я вспомнил один принцип, применявшийся лет 20 тому назад в некоторых калориметрических опытах для предохранения нагретых тел от охлаждения, и мне показалось, что он применим также и к предохранению холодных тел от нагревания. Таким образом я попробовал сохранять сжиженный газ в сосудах с двойными стенками, воздух между которыми был сильно разрежен; опыт показал, что в таком «пустом сосуде» жидкий воздух испаряется в пять раз медленнее, чем в том же сосуде с воздухом между стенками — настолько конвекция тепла частицами газа уменьшается сильным разрежением. Вскоре оказалось возможным устроить эти сосуды так, чтобы их лучеиспускание было тоже почти устранено; было именно найдено, что если внутренние стенки сосуда покрыть

блестящим слоем серебра, то излучение тепла уменьшается в 6 раз сравнительно с излучением такого же сосуда без металлического покрова. Совместное действие сильного разрежения и посеребрения выражается уменьшением потери тепла до 3%.

Пригодность таких сосудов зависит от степени разрежения между стенками, а холод является лучшим средством для его достижения: стоит только все пространство, которое мы желаем разредить, наполнить легким оседающим паром и затем заморозить этот пар в сосуде, соединенном с главным, от которого потом он отпаивается. Преимущества этого способа заключаются в том, что он не требует разрежающего насоса, и что разрежение, которое может быть им достигнуто, теоретически говоря, не имеет предела. Дело идет быстро, если охладителем является жидкий воздух и если употреблять пары ртути или бензола. А при употреблении жидкого водорода пространство между стенками можно и не наполнять парами, ибо тогда сам воздух легко оседает; иными словами, если жидкий водород налить в сосуд с двойными стенками, пространство между которыми наполнено воздухом, то последний немедленно замерзает, и таким образом водород сам себя окружает сильной пустотой.

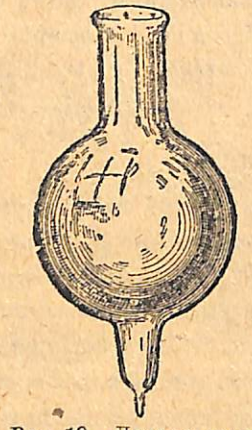


Рис. 19. Дюаров сосуд снаружи.

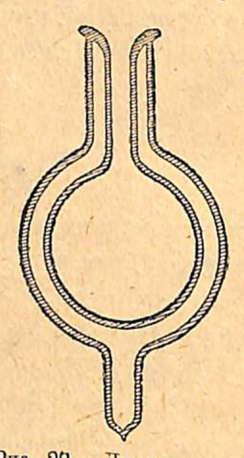


Рис. 20. Дюаров сосуд в разрезе.

Дж. Дюар.

«О холоде», 1902.

Примечание. Сосудов Дюара с сжиженными газами нельзя закупоривать, иначе они взрываются давлением паров кипящей жидкости. Жидкий воздух хранят и перевозят в *открытых* сосудах. — *Сост.*

Опыты с жидким воздухом.

Молочная жидкость, получаемая из машины Линде (для добывания жидкого воздуха), пропускается через обыкновенный бумажный фильтр, вставленный в стеклянную воронку. Из фильтра течет в сосуд жидкий воздух, прозрачный, с голубоватым оттенком. Температура его около 190° мороза. На фильтре же остаются снегоподобные комочки твердой угольной кислоты. Во время фильтрования жидкий воздух кипит, и воронка окружается облаками, состоящими из водяного пара комнаты, превращаемого испарившимся холодным воздухом в туман, а также из выпадающих кристалликов угольной кислоты.

Жидкий воздух, получаемый машиной Линде, имеет состав, отличный от атмосферного воздуха: вследствие более быстрого испарения азота, он богаче кислородом и содержит его от 37% до 40%. По мере испарения воздуха и уменьшения его объема он становится все богаче кислородом.

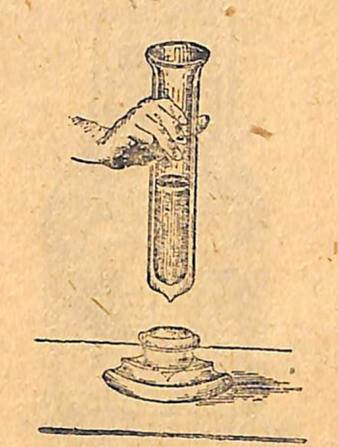


Рис. 21. Жидкий воздух.

Описываем опыты.

Задувши пламя горящей лучины, так, чтобы на конце ее образовался раскаленный уголек, погружаем лучину в сосуд с жидким воздухом: лучина воспламеняется вследствие избытка кислорода в сосуде.

Конец каучуковой трубки погружается в жидкий воздух: он затвердевает. Вынутый и положенный на твердую подставку, он раскалывается ударом молотка.

Цинковая пластинка, погруженная в жидкий воздух, становится хрупкой, как закаленная сталь; она разбивается от удара.

Каучуковая трубка сгибается петлей, которая погружается в жидкий воздух. После затвердевания она вынимается. Получаем упругую каучуковую трубку с твердым загибом. Один конец трубки закрепляется, а на другой вешается гиря в 5 фунтов. Трубка вытягивается, — но загиб остается, покрытый снегом, образующимся насчет

водяных паров комнаты, и по мере нагревания постепенно выпрямляется.

Ртуть, коньяк, спирт, налитые в пробирки, погружаемые в жидкий воздух, замерзают.

Интересное явление представляет большая капля жидкого воздуха, брошенная на воду, налитую в глубокую тарелку или блюдечко. Эта капля принимает вид сфероида, плавающего по поверхности воды и испаряющегося постепенно. Жидкий воздух приходит в так называемое сфероидальное состояние, принимаемое жидкостями, брошенными на раскаленную поверхность. Поверхность воды, имеющей температуру комнаты, представляется раскаленною по отношению к жидкому воздуху, имеющему температуру 190° мороза.



Рис. 22. Корзина с Дюаровым сосудом для перевозки жидкого воздуха (в закрытом и открытом виде).

В такое же сфероидальное состояние приходит жидкий воздух, когда при переливании он течет по стенке сосуда или прикасается к теплой пробирке, в него погруженной. Слой воздушных паров отделяет жидкий воздух от погруженных в него тел, пока эти тела, охладившись, не станут смачиваться жидкостью.

В сфероидальное же состояние приходит капля жидкого воздуха, попавшего на руку: опасность «ожога» не наступает мгновенно, а только по истечении некоторого времени от момента соприкосновения руки или пальца с жидким воздухом.

Жидкий сфероид воздуха, плавающий на воде, постепенно испаряется и оставляет после себя след в виде круглой ледяной лодочки или корки, которая под ним образовалась.

Погружаем конец стеариновой свечи в жидкий воздух до полного ее охлаждения; вынимаем и подвергаем ее действию света вольтовой дуги. Внося затем в темноту, мы видим голубой свет, истекающий из стеарина. Берем куриное яйцо, выпускаем из него все содержимое, укрепляем в отверстии бокала и наливаем в него жидкого воздуха. После действия света вольтовой дуги и внесения в темноту скорлупа изливает синий свет.

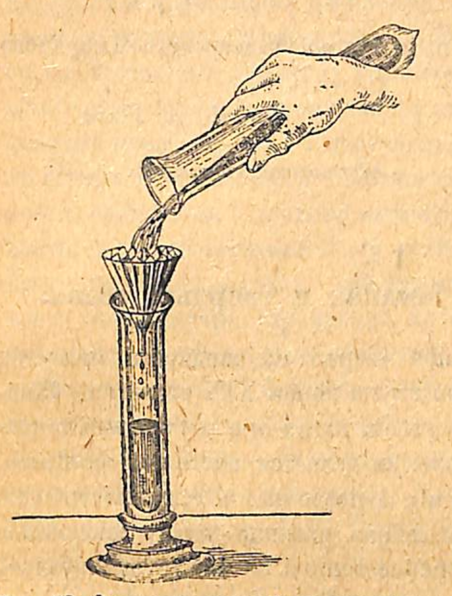


Рис. 23. Отделение твердой углекислоты от жидкого воздуха фильтрацией.



Рис. 24. Горение тлеющей лучины в жидком воздухе.

Лаборатория низких температур, в которой тела, подвергаемые крайнему холоду, приобретают необычные свойства, показывает нам в перспективе будущее, которое наступит для нашей планеты [1]), если

[1]) При постепенном угасании солнца. — *Сост.*

разум человека не овладеет тайнами природы. В этой лаборатории воздух представляется жидкостью, имеющей около 190 градусов мороза; резина и кожа становятся хрупкими, как мрамор; кислота и металл, столь враждебные друг другу при обычных условиях, существуют рядом, без разрушающего взаимодействия [1]); кусок сукна, охлажденный жидким воздухом, в лучах электрической лампы сам испускает свет.

Низкая температура вообще является могучим средством научного исследования.

Н. А. Умов.

«Криогенная лаборатория», 1899.

Тепловое движение в жидких и твердых телах.

Распространение кинетической теории на жидкости является одним из самых крупных успехов науки конца XIX столетия. Жидкости получаются при сгущении газов, когда при понижении температуры взаимное стремление молекул делается настолько сильным, что может управлять их движением и не позволяет молекулам свободно бродить в пространстве. Существенная разница между жидкостью и газом заключается только в крайне тонкой пленке, существующей на границе или поверхности жидкости. Внутри жидкости мы имеем свободное и независимое движение молекул, которым они обладают в силу имеющегося запаса кинетической энергии, и не стесняемое ничем, кроме взаимных столкновений, т.-е. то же, что и в газе. Правда, молекулы жидкости расположены вообще гораздо теснее, чем молекулы газа, и число их столкновений гораздо больше. «Свободный путь» молекулы, или то среднее расстояние, которое они проходят в промежутке между двумя столкновениями, у жидкостей крайне мал. Даже у газов, при нормальных условиях, этот свободный путь, вообще говоря, лежит за пределами микроскопического видения. Понятно, что в жидкостях молекулы движутся по крайне запутанным зигзагам, постоянно изменяя направление движения, и проходят большие пути, не удаляясь значительно от исходной точки, так что, несмотря на большую скорость движения, они не могут быстро диффундировать. Можно было бы предположить, что, вследствие естественного стремления молекул сблизиться, характер движения молекул жидкости будет иной, чем молекул газа. Это не имеет места **внутри** жидкости. Внутри все притяжения распределены равномерно по всем направлениям и взаимно уничтожаются. Молекула притягивается со всех сторон одинаково, и поэтому характер ее движения не зависит от того, существуют ли эти притяжения на самом деле или нет. Существенные отличия между жидким и газообразным состояниями заметны только на поверхности жидкости. Стремление молекулы, лежащей на поверхности, сблизиться с другими молекулами, т.-е. двигаться внутрь жидкости, не уравновешивается никакими причинами, которые заставляли бы ее двигаться наружу. Это вызывает стремление молекул поверхности войти внутрь, стремление, которое мы называем поверхностным натяжением и которым практически обусловлены все различия между жидкостью и газом. Внутри — полная свобода движения, беспорядочное метанье из стороны в сторону взбудораженного роя молекул, движущихся сразу по всем направлениям, сталкиваясь и отскакивая, но никогда не останавливаясь. В жидкости этот рой гораздо гуще, движения его гораздо более беспорядочны, чем в газе; но это различие несущественно . . .

Какой коренной переворот в идеях произошел за последние десять лет XIX столетия! Вода, в глазах поэта — символ мира и покоя, течение которой представляется спокойным, непрерывным, скользящим движением, при рассмотрении в «молекулярные очки» науки представляет картину, сравнительно с которой самая бешеная борьба в дерущейся толпе представляется абсолютной тишиной . . .

Вечное движение, скорость которого пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры, является общим свойством жидкого и газообразного состояний. Относительно твердых тел мы знаем гораздо меньше. Понятно, что в кристаллическом твердом теле не может быть поступательных движений молекул, так как кристалл состоит из молекул, расположенных в пространстве совершенно определенным геометрически образом друг относительно друга. В твердом теле должны происходить колебания молекул около их положений;

[1]) Химические реакции замедляются до крайности при весьма низких температурах.

с повышением температуры эти колебания усиливаются, пока молекулы, не начнут наконец, так сказать, сниматься с якоря, и тело не начнет плавиться.

Фр. Содди.

«Материя и энергия». 1911.

Примечание. «Подробный разбор тепловых движений частиц веществ показал, что эти движения отличаются от *звуковых* колебаний только большей быстротой, так что сравнительно медленные колебания частиц представляют звуковые явления, воспринимаемые ухом, между тем как быстрейшие колебания составляют сущность явлений тепловых и воспринимаются органом осязания. Таким образом неожиданно был (в 1911 г.) перекинут широкий мост между такими двумя отделами физики, как акустика и учение о теплоте, которые казались ничего общего между собою не имеющими и стоящими весьма далеко друг от друга. (Проф. *О. Д. Хвольсон).*

Броуновское движение.

Яркое доказательство правильности кинетической молекулярной теории дает явление, которое первым наблюдал около ста лет тому назад ботаник *Броун* и которое по его имени принято обозначать, как б р о у н о в с к о е д в и ж е н и е. Если вообразим какой-нибудь предмет подвешенным в воздухе, то он, согласно атомистическому воззрению, подвергается со всех сторон ударам наскакивающих на него молекул воздуха. Если этот предмет, однако, настолько велик, что видим простым глазом, то даже в ничтожную долю секунды он получает миллионы толчков. Так как, однако, толчки эти происходят по всевозможным направлениям, то вследствие большого числа толчков, их действие взаимно уничтожается. Следствием будет то, что хотя подвешенный предмет приобретает некоторое дрожание от толчков молекул, дрожание это, однако, незаметно у объектов, видимых невооруженным глазом. Но если мы вообразим себе объект гораздо меньший — например, частицу материи, которую даже в микроскоп нельзя увидеть, а разве лишь в ультра-микроскоп [1]), тогда единичные отступления толчков от среднего значения должны проявиться заметным образом, и частица должна приобрести оживленное зигзагообразное движение.

---

[1]) Изобретенный в 1903 г. ультрамикроскоп дает возможность обнаружить частицы, которые в обыкновенный микроскоп нельзя увидеть; ультра-микроскопические частицы (меньшие 1000-й доли миллиметра) можно о б н а р у ж и т ь, хотя нельзя различить их форму; они представляются в виде светящейся точки.—*А. Х.*

И действительно, еще в 1827 г. *Броун* открыл под микроскопом удивительные неправильные движения цветочной пыльцы, которая находилась в жидкости и линейные размеры отдельных пылинок которой составляли около 200-й доли миллиметра. Броун установил также, что движения эти тем живее, чем мельче пылинки.

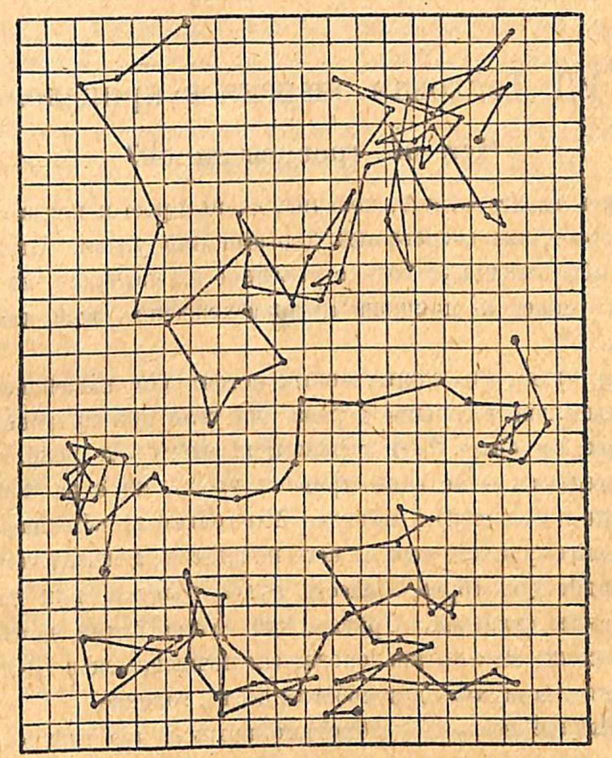


Рис. 25. Броуновское движение. Пути трех крупинок (по Перрену). Диаметры крупинок — около 0,001 миллиметра. Отмечены положения крупинок через каждые полминуты и соединены прямыми линиями.

Лишь полвека спустя *Хр. Винер* понял истинную причину этого явления, объяснив его внутренним движением, которое, согласно кинетической теории, приписывается материи. Значительно позже удалось *Эренгафту* доказать существование Броуновского движения в газах. Точной формулировкой теория Броуновского движения больше всего обязана *Эйнштейну* и *Смолуховскому*.

Проф. *Артур Хааз.*

«Физическая картина мира», 1924.

VII. Тепловая энергия в природе.

Чем мы греемся зимой?

Отвечать на это можно, конечно, очень просто: когда солнце не довольно греет, мы согреваемся дровами или углем. Это, однако, ничего не объясняет: тут только указание на материал, из которого отделяется тепло, а причина и происхождение этой теплоты не объяснены.

Мы все знаем, что единственным источником нашей искусственной теплоты служит горение дерева или угля при притоке воздуха, без которого не может быть горения; из этого уже ясно, что материал для теплоты — не одни дрова и уголь, но в равной степени (если еще не в большей) и воздух. Мы только не обращаем на него внимания, потому что ничего за него не платим; а между тем, на один пуд дров идет при горении шесть пудов воздуха, или по объему, 10 кубических саженей. Правда, что только пятая часть, именно две кубических сажени кислорода, заключающиеся в 10-ти кубических саженях воздуха, идут собственно на горение.

Потребление воздуха необходимо потому, что только при действии его кислорода на вещество дерева отделяется теплота, вследствие общего закона природы, что когда два вещества соединяются между собою химически, чтобы образовать новое сложное вещество, то отделяется теплота. В нашем случае соединение кислорода с углем по преимуществу и образование известного всем газа — угольной кислоты и есть причина горения и тепла. Один пуд дерева, сгорая, может нагреть от 0° до кипения 30 пудов воды, а один пуд угля нагревает 80 пудов воды до той же температуры [1]). Вступая

в другие соединения, например, входя в состав дерева, уголь почти не отделяет тепла, но с кислородом он отдает наибольшее количество, к которому он способен, зато продукт этого горения, угольная кислота, уже никуда не годится в этом отношении. Этот газ представляет материал уже совершенно выгоревший, неспособный более отделять тепло; уголь и кислород в нем потеряли всякую нагревательную силу. Напротив, в дереве уголь сохранил почти всю свою силу, весь свой запас, который и выделяется при горении дерева.

Химические исследования показали, что дерево состоит как бы из угля и воды (т.-е. из углерода, водорода и кислорода, последние два в пропорции для образования воды); поэтому в пуде дерева до 18 фунтов угля. При горении дерево превращается за счет кислорода воздуха в воду и углекислоту; но так как водород находит кислород в самом дереве, то теплота происходит исключительно от сгорания 18 фунтов угля.

Итак, мы видим, что прямая причина отделения тепла при горении есть химическое соединение углерода дерева с кислородом воздуха.

Перехожу теперь к главному предмету статьи: к происхождению этой теплоты, которая как бы собрана и запасена деревом.

Очевидно, что эта теплота находится в дереве не в обыкновенном своем виде, не в таком, например, как в горячей воде. Дерево и воздух, два материала горения, могут быть совершенно холодными, но стоит только нагреть их в одном месте, и от одной искры химическое действие горения распространится во всей массе. Количество отделяющейся теплоты не имеет никакого отношения к тому ничтожному количеству теплоты, которое нужно для начала горения.

Откуда же является эта теплота?

Не трудно доказать, что теплота, которая отделяется при горении дерева и угля, есть не что иное, как *солнечная теплота*, собранная деревом во время его роста и отделяющаяся потом во время его разрушения.

Простое рассуждение естественно наводит нас на эту мысль. В самом деле, без солнечной теплоты дерево не может расти; его рост даже пропорционален количеству этой теплоты. От теплоты солнца образуется вещество дерева, которое потом отдает нам эту теплоту. Но такое рассуждение основано только на предположении и не убеждает нас. Обратив внимание на то, откуда и каким образом берется в дереве уголь, главный источник теплоты, и сравнив с тем,

---

[1]) *Упражнение.* Проверьте эти числа, исходя из того, что теплотворная способность сухого дерева (т.-е. число б. калорий, выделяемых 1 *кг* дерева при полном сгорании) равна около 3000, а угля среднего качества — около 8000. — *Сост.*

что образуется при горении дерева, мы нападаем на след самой теплоты.

Исследования показали, что уголь отлагается в дерево из угольной кислоты, т.-е. из материала, совершенно негодного для нагревания, в котором уголь уже раз сгорел. Процесс, посредством которого дерево присоединило к себе уголь, противоположен тому, который происходит при горении дерева. В случае горения уголь соединяется с кислородом, сгорает, превращаясь в углекислоту; напротив, при развитии дерева, как показал опыт, кислород отделяется: угольная кислота разлагается, уголь ее остается в дереве, а кислород выделяется. Там кислород поглощается, здесь он выделяется. Этот процесс выделения кислорода, или, как говорят, восстановления элементов (углерода и водорода) происходит от действия солнечных лучей. Таким образом солнце возвращает углю его первоначальную способность нагревать.

С другой стороны, из многих опытов выведен общий химический закон, что при химических соединениях двух тел отделяется ровно столько теплоты, сколько поглощается при разложении сложного тела, из них получаемого. Не такое ли отношение видим мы здесь между явлениями горения дерева и его развития: соединение угля с кислородом и разложение углекислоты на уголь и кислород. Следовательно, при образовании дерева поглощается столько же теплоты, сколько развивается при его горении. Откуда же дерево может брать теплоту, как не от солнца? Другого источника теплоты мы не знаем.

Итак, основываясь на этих двух данных опыта, что при образовании дерева действительно происходит процесс, обратный горению, и что при обратных химических действиях (т.-е. при разложении и горении, всегда одинаковое количество теплоты поглощается или выделяется, мы в праве сказать, что теплота, отделяющаяся при горении дерева, есть теплота, поглощенная при его образовании, т.-е. что это есть *солнечная теплота* [1])...

---

[1]) При этом растения используют лишь незначительную часть получаемой от солнца энергии. «Зная, с одной стороны, сколько горючего материала заключает урожай, получаемый с известной площади (а это мы узнаем из анализа), зная, с другой стороны, какое количество тепла посылает солнце на эту площадь, мы имеем все необходимые данные для суждения о количестве поглощенной растением энергии. Производя вычисления, приходим к тому заключению, что наибольший ежегодный прирост леса заключает в себе около $^1/_{700}$ всего тепла, посылаемого на соответствую-

Мало того, мы можем даже сказать, что теплота, которую солнце разливало по земле в самые отдаленные геологические эпохи, когда еще не было человека и когда рос тот лес, который дошел до нас в виде неисчерпаемых пластов каменного угля, — что эта теплота сохранилась до нас вместе с этим углем и доставляет нам теперь и долго еще будет доставлять и тепло и паровую силу.

Эти мысли были высказаны еще знаменитым изобретателем локомотивов и железных дорог Стефенсоном, который, показывая на движущуюся машину, говорил, что теплота, приводящая ее теперь в движение, есть теплота солнца, когда-то согревавшая Землю.

Акад. *Н. Н. Бекетов.*

«Речи химика» 1862.

Энергия солнца — первичная причина жизни на земле.

Тщательный разбор всего того, что совершается перед нами на земле, давно привел исследователей к заключению, что первичной причиной всей жизни здесь приходится признать солнце. Вглядитесь пристально в первые два-три попавшиеся под руку явления природы: анализ происходящего непременно приведет вас к заключению, что основною, конечною причиною любого из явлений, к которой непременно приведет исследование, всегда является это животворящее светило.

Из тучи пронесся благодатный ливень, все напоивший живительной влагой . . . Но ведь прежде, чем эта туча разрешилась ливнем, она должна была образоваться из того водяного пара, который поднялся с поверхности какого-нибудь водоема или испарился с поверхности влажной почвы. А чтобы началось это испарение, надо было ведь, чтобы нагрелся тот водоем, озеро, река, с которой взялся этот

щую площадь земли за шестимесячный период растительности . . . Самые большие урожаи овса, ржи (зерна, солома и корневые остатки) представляют $^1/_{80}$ всей полученной энергии. Таким образом, при помощи растения мы в состоянии воспользоваться примерно от 0,001 до 0,01 всего того количества солнечных лучей, которые выпадают на поверхность наших лесов и полей за период деятельной растительности». *(К. А. Тимирязев). — Сост.*

пар. Откуда же могли нагреться этот водоем или влажная почва? Только лучами солнца. Значит, не будь солнца и его лучей, не быть бы и ливню.

На ниве налился зерном колос. Но для того, чтобы начало расти зерно, из которого этот колос вырос, то же солнце должно было прогреть землю. Запасшись от солнца теплом, принесенным лучами в влажную землю, зерно начало расти, т.-е. втягивая из земли образовавшуюся здесь от дождей воду, оно под действием солнечного тепла стало перерабатывать втянутые вещества в ткани. Но вода могла явиться только после дождя, принесенного солнцем. Под действием тех же солнечных лучей растение зацвело, дало колос и новое зерно. Разве не солнце явилось здесь первичным двигателем?

По гладкому стальному полотну мчится товарный поезд: за тяжело громыхающим локомотивом длинною цепью извиваются десятки вагонов. Что же за могучий демон сидит внутри этого чудовища современной техники? И опять: все то же солнце своими лучами запасло для локомотива топливо, которое превращает в котле локомотива воду в пар; пар привел колеса в движение, за локомотивом побежали и тяжелые вагоны с грузом. Разве дрова — не продукт работы солнечных лучей? Ведь дерево выросло за счет солнечного тепла и воды, принесенной солнечными лучами? А каменный уголь — это минеральное топливо, образовавшееся некогда как результат окаменения различных древесных пород.

Еще последний пример: ребенок кушает за столом кашу, которая приготовлена в соседней кухне. Но каша сварена из зерна, выращенного солнцем, на дровах из дерева, выращенного солнцем. Разве не солнцу обязаны мы своей пищей, разве не солнце превращает нас в взрослых людей и, развив насчет пищи наши мускулы, дает нам силы для выполнения нашей ежедневной работы?

Солнце — первичная причина жизни на земле, за счет которой происходят и развиваются все явления в мертвой природе или живых организмах.

Проф. *Г. А. Любославский.*

«Солнечный луч, как основная причина метеорологических явлений», 1911 г.

Приход и расход солнечной энергии на земле.

I. Приход.

Жизнь на земной поверхности, во всем ее разнообразии, поддерживается теми потоками энергии, которые врываются в нашу атмосферу в форме солнечных лучей. Общий приход этой энергии громаден. По приблизительному подсчету, нужно 600000 лет сожигать весь добываемый ныне человеком горючий материал (дрова, уголь и пр.), чтобы получить то количество тепла, которое солнце посылает на земную поверхность в течение одного года.

Солнечные лучи нагревают земную поверхность; тепло это постепенно передается от слоя к слою как вглубь, так и в атмосферу, и обусловливает в почве и в атмосфере тот запас тепла, который столь необходим для всякой органической жизни.

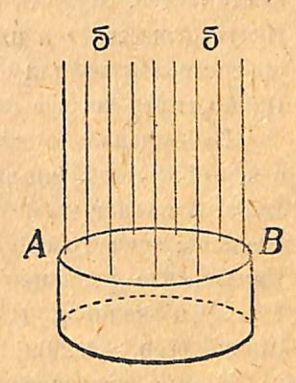


Рис. 26. Способ измерения солнечной радиации.

Вырежем мысленно из общего потока солнечных лучей призматический пучок, сечение которого равно 1 квадратному сантиметру. Подвергнем действию этого пучка в течение, например, одной минуты, вычерненную поверхность какого-нибудь тела, поставленного перпендикулярно к оси пучка. Энергия пучка поглощается телом и потребляется на его нагревание. Если нам удастся определить, сколько именно тепловых единиц получило наше тело в течение опыта, то мы получим напряжение солнечной радиации (совокупности всех его лучей). Таким образом, напряжение солнечной радиации выражает то количество тепла, которое получает каждый квадратный сантиметр поверхности, помещенной нормально (перпендикулярно) к солнечным лучам. Представим себе тело, имеющее форму прямого цилиндра (рис. 26), вес которого равен 100 г. Положим, далее, что для нагревания каждого его грамма нужно 0,6 граммокалорий (т.-е. малых калорий). Верхнее вычерненное основание AB, площадь которого равна 85 $см^2$, установлено нормально к солнечным лучам (поверхность его вычернена, чтобы увеличить ее поглощательную способность). При помощи термометра мы находим, что тело в тече-

ние 5 минут нагрелось например, на 8°. Если бы весь цилиндр весил 1 *г* и нагрелся на 1°, то для этого потребовалось бы 0,6 калорий. Так как наше тело весит 100 *г* и нагрелось на 8°, то оно получило $0{,}6 \times 100 \times 8$ калорий. Это количество тепла поглощено в течение 5 минут площадкой в 85 $см^2$. Следовательно, каждый кв. см в 1 минуту получал

$$\frac{0{,}6 \times 100 \times 8}{85 \times 5} = 1{,}13 \text{ калорий.}$$

Прототипом (первоначальным образцом) приборов, построенных на этой идее, служит пиргелиометр *Пулье*. Кроме прибора, Пулье существует в настоящее время много других, более точных, приспособленных для определения напряжения солнечной радиации. Приборы эти вообще называются актинометрами.

Наблюдения показали, что полное напряжение радиации в ясный и безоблачный день с восходом солнца постепенно возрастает, достигает максимума в околополуденные часы и затем падает к закату; иначе говоря в ходе радиации обнаруживается дневной ход. Напряжение радиации в околополуденные часы может достигать 1,4 — 1,5 калории (Одесса — 1,43, Киев — 1,39, Слуцк — 1,45, Шпицберген — 1,29).

Если с актинометром в руках будем подниматься над земной поверхностью, то толщина поглощающего слоя, находящегося у нас над головой, станет постепенно уменьшаться, а следовательно, напряжение радиации должно увеличиться. И действительно, в полуденные часы на Тенерифе (высота 3688 м) найдено 1,615, на вершине Зонблика (3106 м) — 1,6, на Монтэ Роза (4560 м) — 1,6 калории. Некоторые косвенные соображения приводят к тому заключению, что на границе нашей атмосферы каждый квадратный сантиметр, поставленный перпендикулярно к солнечным лучам, получает каждую минуту две калории. Напряжение солнечной радиации на границе атмосферы называют солнечной постоянной.

Солнечная радиация, проходя через атмосферу, частью теряется. Потеря эта происходит двумя путями. Некоторая часть лучей рассеивается частицами самой атмосферы, а также плавающими в ней пылинками; другая непосредственно поглощается. Главной поглощающей средой являются водяные пары, сосредоточенные в более низких ярусах нашей воздушной оболочки.

Очевидно, что напряжение солнечной радиации будет тем слабее, чем толще и плотнее пройденный лучами слой и чем он богаче водяными парами. Изложенными соображениями легко объясняется дневной ход радиации, а также усиление ее по мере поднятия над земной поверхностью.

В ходе солнечной радиации должна существовать также годовая периодичность. В полуденные часы зимою солнце ниже, чем летом, но в зимние месяцы в атмосфере содержится меньше паров, чем летом; а потому можно предположить, что полуденные напряжения радиации не должны особенно разниться друг от друга. И, действительно, из наблюдений видно, что полуденная радиация колеблется в Павловске между 0,85 (декабрь) и 1,36 (апрель).

II. Расход.

Мы рассматривали приход. Но поверхность земли также постоянно теряет известный запас тепла. Всякое тело, находящееся в среде, имеющей более низкую температуру, теряет тепло путем лучеиспускания. Хотя у нас нет точных данных о температуре междупланетного пространства, но она во всяком случае должна быть очень низка; следовательно, земля наша должна постоянно лучеиспускать к этой холодной среде. В дневные часы расход этот покрывается с избытком лучеиспусканием солнца и во всей своей силе выступает в ночные часы, а потому эту потерю тепла называют ночным лучеиспусканием. Особенно резко выступает ночное охлаждение в пустынях Старого и Нового Света. В Индии на поверхность воды, налитой в широкие глиняные сосуды, поставленные под открытым небом на соломе, может образоваться в ясные безоблачные ночи слой льда до 2 *см* толщины, в то время, как термометр на высоте 1,7 *м* над почвой (высота человеческого роста) показывает 5°—8°. Мы нередко можем наблюдать, что снег, находящийся в тени, при ясной погоде не тает, в то время как температура воздуха колеблется от 6° до 7°.

Для обнаружения ночного излучения кладут один термометр на поверхность почвы, а другой — на известной высоте (или, еще лучше, в термометрической будке). Первый термометр будет измерять температуру почвы, а второй — температуру воздуха. Показания второго термометра вообще выше отсчета первого, и разность их считают мерою ночного лучеиспускания. Наблюдения показали, что эта разность изменяется в зависимости от различных факторов.

При одинаковых прочих условиях она тем больше, чем яснее и безоблачнее небо. Туман уменьшает эту разность иногда до нуля. Если над термометром установить навес из сукна или войлока, то этот навес предохраняет защищенную часть почвы от охлаждения. Роль такого покрова играют облака, особенно низкие и плотные; высокие облака, вследствие своей низкой температуры, оказывают лишь слабое действие. Ночное лучеиспускание уменьшается вообще с увеличением количества паров в атмосфере. Водяные пары, следовательно, играют роль регулятора в атмосфере; с одной стороны, они, поглощая часть солнечной радиации, предохраняют поверхность земли от сильных нагреваний; с другой — ослабляют интенсивность ночных охлаждений.

Интенсивность ночных охлаждений зависит, далее, от физических свойств охлаждающихся тел и испускательной способности их поверхности: поверхности белые и блестящие охлаждаются слабее, чем черные и шероховатые; поверхность металлических масс — меньше, чем поверхность непроводника; трава обнаруживает более низкую температуру, чем почва, лишенная растительности.

Ночное охлаждение ограничивается только поверхностным слоем и редко проникает глубже дюйма. Разность между показаниями термометров может достигать в наших широтах 7° — 8°. Лучеиспускает даже поверхность снега. Ночное излучение достигает наибольшей интенсивности при ясной, безоблачной погоде. Присутствие паров и пыли уменьшает прозрачность атмосферы и уменьшает лучеиспускание почвы. На высоких горах, где воздух прозрачнее, лучеиспускание сильнее.

В ясные, безоблачные ночи, когда поверхность почвы сильно охлаждена, охлаждается также прилегающий слой воздуха. Пары, в нем находящиеся, также охлаждаются и мало-по-малу приближаются к состоянию насыщения; наконец, они достигают точки росы и осаждаются в форме капель (роса), если температура сгущения выше нуля, или в твердой форме (иней), если температура насыщения ниже 0°. В последнем случае происходят у т р е н н и к и, столь опасные поздней весной, так как в это время молодая растительность наших полей и садов еще не вполне окрепла и крайне чувствительна к резким колебаниям температуры.

Тщательные наблюдения показали, что перевес расхода тепла над приходом наступает уже за час-полтора до захода солнца,

а потому перед наступлением сумерок температура воздуха в самом нижнем его слое быстро падает. В совершенно ясные и безоблачные ночи один квадратный сантиметр вычерненной поверхности, по наблюдениям в Одессе, теряет в м и н у т у, средним числом 0,14 калорий; на горной вершине Зонблика (3106 *м*) потеря эта достигает 0,221 калорий.

А. В. Клоссовский.

«Краткий курс метеорологии», 1916 г.

Источник энергии животных.

Чем объяснить способность передвижения живых существ, и в чем источник их силы? Строителям автоматов люди и животные казались механизмами, не нуждающимися в заводе, т.-е. носящими в себе источник живой силы; они не знали еще о зависимости живой силы, которая существует между принятием пищи и восстановлением сил. Но после того, как мы познакомились с источником двигательной силы паровых машин, приходится спросить, не происходит ли чего-нибудь подобного и у людей? В действительности, сохранение жизни находится в прямой зависимости от пищи, которая, будучи переварена, продолжает свою деятельность, переходя в кровь и подвергаясь в легких медленному окислению; продукты его почти те же, что при горении на открытом воздухе. А так как количество выделяющейся теплоты не зависит ни от хода, ни от продолжительности реакции, то, зная количество принятой пищи, можно вычислить в точности количество выделившейся теплоты, а следовательно, и эквивалентное ему количество работы. К сожалению, затруднения при производстве соответствующих опытов еще очень велики: однако, сделанное до сих пор вполне подтверждает это количественное отношение. Таким образом, живые организмы отличаются от паровых машин не источниками двигательной силы, а целями и способами ее применения. Далее, они в выборе горючего материала более ограничены, чем паровая машина. Последняя с одинаковым успехом может быть истоплена сахаром, крахмалом, маслом или углем и дровами. Животный организм должен искусственно превратить в жидкое состояние свое топливо, распределить его между различными органами; сверх того, он должен постоянно возобновлять легко утрачивающийся материал своих органов и, не имея возможности выработать нужные для того вещества, принимать их извне. *Либих*

был первый, обратившии внимание на существенно различные назначения принятой пищи. Для восстановления израсходованного материала могут служить, как оказалось, одни лишь белковые вещества, вырабатываемые растениями и составляющие, повидимому, главную составную часть животного организма. Но они представляют собою лишь незначительную часть пищи; большая часть состоит из сахара, крахмала, жиров, — это топливо, при сгорании которого вырабатывается живая сила наших органов; и, может быть, оно потому лишь не может быть заменено углем, что последний нерастворим.

Если процессы в организованных телах в этом отношении ничем не отличаются от неорганических, то возникает вопрос: откуда доставляются им питательные вещества, служащие для них источником силы? Из царства растений, так как лишь растения и мясо травоядных животных могут быть употребляемы в пищу. Травоядные представляют промежуточную ступень, посредством которой плотоядные, к которым надо отнести и человека, получают тот необходимый для питания материал, которого они непосредственно переварить не могут. Сено и трава содержат те же питательные вещества, что и рожь, но в меньшем количестве. А так как пищеварительные органы человека не в состоянии извлечь малого количества ценного материала из нерастворимой массы, то мы подвергаем его сперва обработке со стороны могучих органов питания рогатого скота, предоставляем ему скопиться в его мышцах для того, чтобы затем воспользоваться ими в более приятной и удобопереваримой форме. Таким образом, для разрешения нашего вопроса надо обратиться к миру растений.

Изучение органической жизни растений указывает, что они живут на счет продуктов горения, выделяемых животными. Они вдыхают из воздуха сгоревший уголь в виде углекислоты, сгоревший водород — в виде воды, азот в его простейших соединениях, например, в виде аммиака, и вырабатывают из этих соединений, при помощи немногих веществ, получаемых из почвы, питательные вещества, для царства животных — белок, сахар, крахмал и масла. Таким образом, мы пришли к некоторому круговороту, к кажущемуся неиссякаемым источнику сил. Растения заготовляют горючие и питательные вещества, животные их потребляют, переваривают и подвергают медленному окислению, продукты которого идут вновь на пищу растений. Одни служат вечным источником химических процессов, другие, — механической силы. Может быть, совокупность

двух органических миров и даст искомое вечное движение? Но такого рода заключение было бы слишком поспешным. Дальнейшие изыскания показывают, что растения способны вырабатывать горючие вещества лишь при содействии солнечных лучей. Солнечный свет, падая на зеленые части растений, совершенно утрачивает «химические» лучи; потому-то листья на фотографиях выходят черными: исходящий из них свет не содержит голубых и фиолетовых лучей и, следовательно, лишен способности разлагать соединения серебра. Кроме голубых и фиолетовых лучей, выдающуюся роль в жизни растений играют желтые; они также поглощаются листьями.

Таким образом, деятельная сила солнечных лучей исчезает в то время, как в растениях образуется и накапливается горючий материал, и мы можем считать весьма вероятным, что это исчезновение является причиною последнего. Надо заметить, что мы не имеем еще опытов, подтверждающих эквивалентность силы исчезнувших солнечных лучей и накопившегося запаса химической силы, и пока их нет, нельзя эту эквивалентность считать доказанной. Если это предположение подтвердится на опыте, то мы будем иметь лестную для нас уверенность в том, что источник жизни, которою живет и движется наш организм, заключается в лучах солнца и что, следовательно, в благородстве происхождения мы все не уступаем китайскому императору, величающему себя сыном неба. Но то же эфирное происхождение разделяют с нами и низшие существа, жабы и пиявки, весь мир растений и даже топливо, скопившееся веками или вновь растущее, употребляемое для наших печей и паровых машин.

Г. Гельмгольц.

«О взаимодействии сил природы».

Пища и энергия.

Животные поедают растения, и тогда питательные вещества последних попадают в кровь и разносятся по всему телу; приходя в соприкосновение с вдыхаемым кислородом, они окисляются им, — так сказать, сгорают, — и выдыхаются в атмосферу в виде углекислого газа и водяных паров. Животная теплота есть теплота, возникающая от сгорания принятой пищи. Работоспособность животных и человека имеет своим источником эту энергию.

Взрослому человеку, когда он не работает, нужно в течение суток 2100 б. калорий, чтобы удерживать температуру тела и крови

на нормальной высоте, т.-е. около 37°Ц. Когда же он усиленно работает, ему нужно 2700 — 2800 б. калорий. Для этого он может принимать в пище ежедневно в среднем 158 граммов белковых веществ, 56 граммов жиров и 500 *г* углеводов (крахмала, сахара); сгорая с соответствующим количеством кислорода, вещества эти и дают упомянутое количество энергии [1]). В теплых странах и при бездеятельной жизни человеку нужно меньше калорий, в холодных странах и при напряженной работе — больше [2]).

Проф. *Л. Пфаундлер.*

«Физика обыденной жизни», *1906.*

Постоянство температуры человеческого тела.

Как происходит то, что температура нашего тела поддерживается постоянной с небольшими только колебаниями, хотя на тепловое состояние его могут влиять самые разнообразные причины? Окружающий тело воздух может быть теплым или холодным, и мы все-таки имеем температуру 37 градусов. Еще больше заставляет задуматься следующее обстоятельство. Мы производим большую работу; при этом одновременно возникает много тепла, и тем не менее температура нашего тела сохраняется на прежней высоте.

Ясно, что в нашем теле имеются средства и возможность регулировать теплообразование и теплоотдачу. Тело может, например, если наружная температура низка, весьма ограничить теплоотдачу. Мы видим, как кожа бледнеет. Это происходит от того, что сосуды кожи сокращаются. Они становятся у́же. Благодаря этому, протекающая через них кровь может отдавать наружу тепло через меньшую поверхность. Теплоотдача проведением и излучением, благодаря этому, уменьшается. Потовые железы перестают отделять. Если одни эти приспособления не достаточны, то организм помогает усиленной теплопродукцией. Единственным средством произвести больше

[1]) Количество энергии, даваемой в человеческом теле 1 граммом белкового вещества, равно 4 б. калории, 1 *г* жира — 9 б. калории и 1 *г* углеводов (сахара) — 4 б. калории. Поэтому упомянутый паек соответствует количеству энергии

$$158 \times 4 + 56 \times 9 + 500 \times 4 = 2836$$ больших калорий. — *Сост.*

[2]) Умственный труд также нуждается в добавочной энергии, но в настоящее время еще не найдено, сколько именно энергии требует та или иная умственная работа. Во всяком случае, количество это меньше, чем при мускульной работе.—*Сост.*

тепла является мускульная работа. Мы начинаем двигаться. Мы видим, как собака дрожит, когда ей холодно: этим она создает тепло.

Мы имеем особые приспособления для уменьшения теплоотдачи. Прежде всего жировая подкладка является плохим проводником тепла. Далее, мы защищаем себя одеждой. Эта последняя действует по преимуществу тем, что создает по возможности неподвижный слой воздуха. Птицы топорщат свои перья, чтобы создать вокруг себя воздушную оболочку. Далее поверхность тела, соприкасающаяся с внешним миром, уменьшается съеживанием, свертыванием тела и т. д.

Если есть опасность, что температура тела повысится или благодаря высокой наружной температуры, или же благодаря производству работы, то наступает усиленная теплоотдача, или уменьшенное теплообразование, или же обе функции выступают сразу. Мы замечаем, что кожа краснеет. Кровеносные сосуды кожи расширяются. Кровь определенным образом распространяется на большую поверхность [1]). Скоро потовые железы начинают отделять. Они выделяют содержащую соль воду. Наступает испарение, при котором поглощается теплота. Это приспособление является наиболее действительным для того, чтобы поглотить в короткое время большие количества тепла. Только тогда, когда пот может испариться, наступает охлаждение. Каждый знает из опыта, какое неприятное ощущение испытываем мы, если при жаркой погоде воздух насыщен водяными парами: мы потеем и тем не менее не чувствуем никакого облегчения. Испарение пота при этом затруднено; мы задерживаем испарение пота весьма сильно тем, что мешаем при помощи плотно прилегающей к телу одежды удаляться заключенному в ней воздуху, который скоро вполне насыщается водяными парами; наступает задержка отдачи тепла, следствием чего возникает, как это хорошо известно, солнечный (или тепловой) удар. Организм может также противопоставить повышению температуры тела уменьшение теплообразования, уменьшение мускульной работы: при большой жаре мы избегаем по возможности всякой деятельности.

Проф *Э. Абдергальден.*

«Основы учения о питании», *1919.*

[1]) Для той же цели мы выливаем слишком горячие напитки из узкого сосуда на тарелку.

Нагревание человеческого тела при работе.

Нагревание человеческого тела во время напряженной работы— один из источников частых недоразумений при первоначальном знакомстве с физикой. Существует убеждение, что человек нагревается оттого, что работает. Простое самонаблюдение, казалось бы, вполне определенно его подтверждает. Однако, специалисты возражают против такого утверждения. В самом деле: оттого, что организм произвел некоторое количество работы, запас энергии в нем должен был не увеличиться, а уменьшиться, — так что теоретически скорее можно было бы ожидать, что человек от работы охлаждается, а не нагревается. Предположить, будто человек нагревается от работы, столь же неправильно, как утверждать, что паровоз горяч потому, что он работает.

Как же разгадать это кажущееся противоречие? Дело в том, что в организме, несомненно, источником энергии является не теплота, а та скрытая потенциальная химическая энергия, которая вводится в организм вместе с пищей; она превращается в организме отчасти во внешнюю работу, отчасти в теплоту, —так что теплота постольку связана с совершением внешней работы, поскольку обе эти формы энергии происходят от одного общего источника. Теплота является не следствием работы и не причиной работы, а неизбежным спутником работы. При усилившемся мышечном напряжении ускоряется кровообращение и дыхание, а потому ускоряется весь вообще обмен веществ в организме, и этот избыток освобождающейся энергии, бывшей до того времени в скрытом, потенциальном виде, и создает одновременно и внешнюю работу и теплоту. Правда, небольшое количество энергии, направленной на внешнюю работу, превращается попутно в теплоту чисто-механическим путем — от трения различных органов друг о друга, от трения кожи об одежду и т. д.; но в виду малой величины теплового эквивалента работы (1 килограммометр работы производит $^1/_{427}$ большой калории), повышение температуры тела от этих трений не может быть сколько-нибудь значительно.

Проф. *М. Ю. Пиотровский.*

«Физика на открытом воздухе», 1924.

ОГЛАВЛЕНИЕ II ВЫПУСКА.

Стр.

I. Теплопроводность. — Тепловое расширение. — Термометр.

II. Количество теплоты.

III. Плавление и затвердевание.